

Capítulo 7

Simulación y resultados del modelo

Una vez descritos los modelos de los componentes en el capítulo anterior, llevaremos a cabo la instanciación y unión de los mismos para la composición final del modelo completo que nos permitirá comprobar su exactitud con respecto al sistema real. El modelo consta de un total de 6 componentes con sus respectivos puertos, estableciéndose un total de 337 ecuaciones.

A lo largo de este capítulo veremos las distintas simulaciones realizadas a partir de las particiones creadas, comentado los resultados obtenidos a través de las gráficas y comparándolos con los del sistema real. Antes de pasar a las simulaciones se expondrán los parámetros de construcción tomados para los ensayos de todos los componentes, así como el formato de las tablas de datos de los ficheros de la planta y otros aspectos como el tiempo de integración relacionados con los experimentos.

7.1. Parámetros de construcción y realización de las simulaciones

Los valores de los parámetros de construcción del modelo empleados para la realización de las simulaciones junto con sus unidades y el componente al que pertenecen se exponen en la siguiente tabla.

Nombre	Tipo	Valor	Ud.	Componente
datafile	FILEPATH	"@PLANTA_SOLAR@/ experiments"	-	Entrada_Flujo
datafile	FILEPATH	"@PLANTA_SOLAR@/ experiments"	-	Sol
datafile	FILEPATH	"@PLANTA_SOLAR@/ experiments"	-	Espejos
año	INTEGER	2011	-	Espejos
mes	INTEGER	9	-	Espejos
día	INTEGER	21	-	Espejos
longitud	REAL	-6	Grados	Espejos
latitud	REAL	37,41	Grados	Espejos
hora_comienzo	REAL	11,5	Hora decimal	Espejos
G	REAL	0,5*11	Metros	Configuración_TUB
Absortancia	REAL	0,94	-	Configuración_TUB
Reflectividad	REAL	0,9*0,49	-	Configuración_TUB
Transmisividad	REAL	0,96	-	Configuración_TUB
Reflectividad secundaria	REAL	0,77	-	Configuración_TUB
Factor ensuciamiento 1	REAL	0,8	-	Configuración_TUB

Nombre	Tipo	Valor	Ud.	Componente
Factor ensuciamiento 2	REAL	0,8	-	Configuración_TUB
pm	REAL	8027	Kg/m ³	Configuración_TUB
Cm	REAL	500	J/Kg°C	Configuración_TUB
diámetro interior tubo	REAL	0,068	Metros	Configuración_TUB
diámetro exterior tubo	REAL	0,071	Metros	Configuración_TUB
Tint	REAL	0,5	Segundos	Configuración_TUB
N	INTEGER	64	-	TUB_CAPTADOR
incx	REAL	1	Metros	TUB_CAPTADOR
datafile	FILEPATH	"@PLANTA_SOLAR@/experiments"	-	Salida_Flujo
Tini	REAL	11,5	Hora decimal	Salida_Flujo

Tabla 7. Parámetros de construcción del modelo

El modelo del captador se validará mediante datos reales tomados de la planta a través del sistema de adquisición de datos de la misma. Los datos vienen dados por tablas que se encuentran en ficheros de texto “.txt” y cada columna de las mismas contendrá los valores de una variable a lo largo de todo el día de prueba. El orden de las variables por columnas en el fichero es: hora (hora decimal), caudal (m³/h), temperatura ambiente (°C), temperatura de entrada (°C), temperatura real de salida (°C), irradiancia (W/m²) y porcentaje de espejos (tanto por cien). Todas estas variables serán tomadas del fichero de datos mediante la función *readTableCols1D*, ya explicada en el apartado 2 del capítulo 6.

A la hora de seleccionar un fichero de datos concreto para la simulación mediante las variables *datafile*, hemos de modificar manualmente algunos parámetros antes de realizar un nuevo ensayo. En concreto, se ha de tener en cuenta el año, mes y día del fichero, así como la hora de comienzo de la prueba y cambiarlos en los componentes que lo requieran.

Una vez fijados todos los valores de los parámetros de construcción, se realiza la partición del modelo y se crean los diferentes experimentos sobre dicha partición. Es importante recordar que los experimentos se crean respecto de una partición previa. Por tanto, si modificamos cualquier aspecto del modelo matemático del sistema, hemos de realizar una nueva partición sobre el mismo o modificar la existente para tener en cuenta dicha modificación en los experimentos posteriores.

Los experimentos creados para el modelo presentan el siguiente código en lenguaje .EL:

```
EXPERIMENT exp1 ON Campo_Solar.default

DECLS
INIT          -- Condiciones iniciales y de contorno ya fijadas
BOUNDS
BODY
    -- Vuelca los resultados a una tabla contenida en la carpeta del experimento
    REPORT_TABLE("reportAll.rpt", "")
    -- Se integra el modelo entre la hora de inicio y final de la prueba
    TIME = 11.5
    TSTOP = 17.5
    -- Se obtienen resultados cada CINT segundos
    CINT = 1.388888889e-4
    INTEG()

END EXPERIMENT
```

Podemos ver en el código del experimento creado automáticamente por EcosimPro a partir de la partición previa realizada que, no se han de fijar ahora ni condiciones iniciales (*INIT*) ni de contorno (*BOUNDS*) en el experimento, puesto que éstas han sido establecidas ya de antemano en el modelo. No obstante, si interesa fijar alguna en este punto, basta con no inicializarla o definirla en el código del componente correspondiente.

La función *REPORT_TABLE*, genera un informe con los resultados de la simulación en forma de tabla. La primera fila contiene los nombres de las variables, la primera columna siempre contiene el tiempo, y las columnas siguientes contienen los valores de las variables en cada instante de tiempo. La tabla generada se puede utilizar directamente en EXCEL, lo cual permite la exportación de datos para su posterior análisis y utilización en otros programas. Las tablas generadas son almacenadas en la carpeta del experimento correspondiente.

Las variables globales TIME, TSTOP Y CINT, se fijan también en función de los datos temporales contenidos en el fichero.

TIME es la variable global que representa el tiempo en la simulación y su valor de inicio se hace corresponder con la hora en decimal de comienzo del ensayo real de la planta, en este caso 11,5. Al igual que TIME, TSTOP es la variables global de tiempo que fija el final de la simulación y que de la misma manera se hace corresponder con la hora en decimal en la que termina el ensayo real de la planta que es 17,5.

CINT representa el tiempo de integración o el intervalo de actualización de los datos en la simulación. Se ha tomado un valor para el mismo de 0,5 segundos, que pasado a unidades de hora decimal que es la base de tiempos empleada en la simulación, da un valor de 1.388888889e-4 segundos.

7.2. Resultados del modelo

Primero se verán las simulaciones realizadas para los componentes *Sol*, *Espejos* y *Entrada_Flujo*, que establecen las condiciones de funcionamiento del modelo con el fin de comprobar su correcto funcionamiento por separado, ya que para éstos no se requiere imponer condiciones externas y por tanto se pueden simular de manera independiente. Una vez comprobado que las condiciones de funcionamiento establecidas para el modelo son las correctas, se procederá a realizar las simulaciones del sistema completo.

Todos los experimentos realizados han sido simulados con la opción del Monitor que posee EcosimPro por resultar más versátil y permitir el análisis inmediato de cualquier resultado en el que estemos interesados. Cada experimento tiene asociada una configuración gráfica en el monitor que nos permite seguir de forma gráfica la evolución de las variables más interesantes del modelo.

7.2.1. Simulación de las condiciones de la planta

Se simularán los componentes *Entrada_Flujo*, *Sol* y *Espejos* para recrear las condiciones reales de funcionamiento de la planta y posteriormente utilizarlas como entradas al componente *TUB_CAPTADOR*. Las gráficas que se muestran corresponden a datos tomados en la planta el día 21 de septiembre de 2011, fichero "DATA110921.txt".

Resultados para el componente *Entrada_Flujo*: se representan las gráficas obtenidas para la temperatura de entrada del fluido al captador en °C, y el caudal de entrada en m³/h.

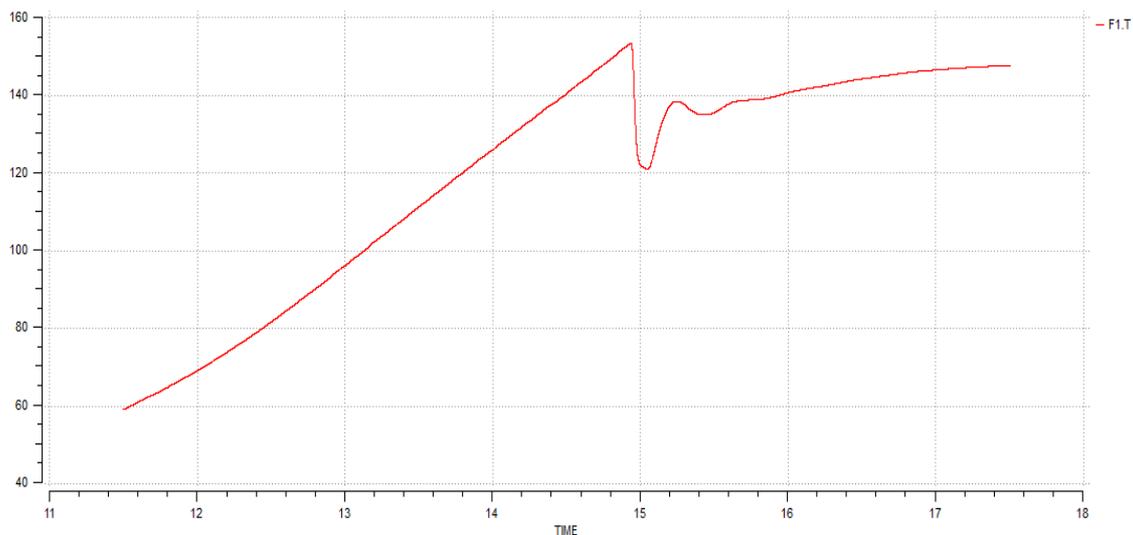


Ilustración 43. Temperatura de entrada del fluido día 21/09/2011

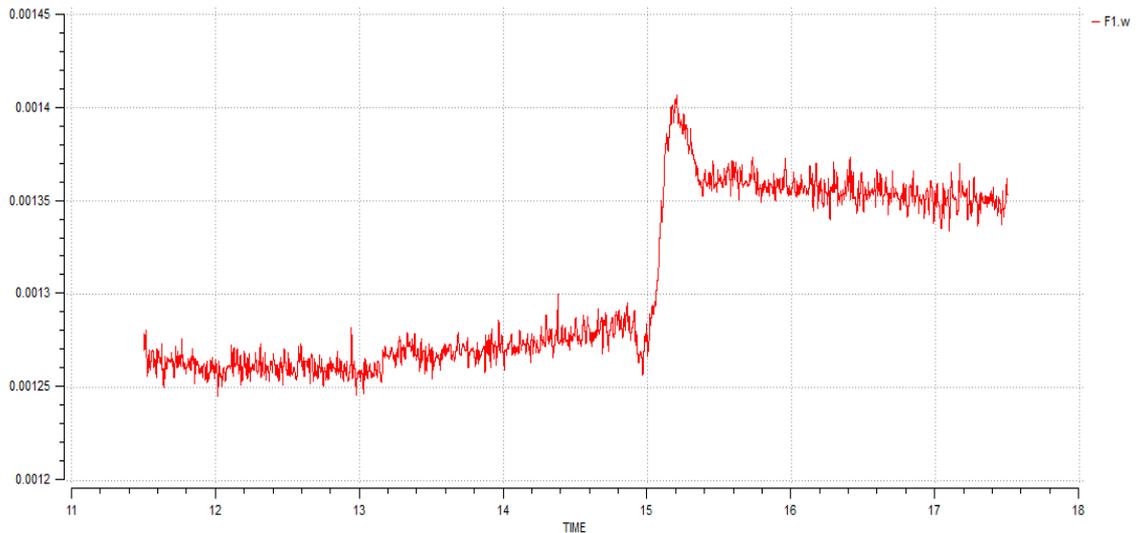


Ilustración 44. Caudal de entrada de fluido día 21/09/2011

Como vemos la temperatura de entrada comienza en 59,5 °C y comienza a aumentar como consecuencia del paso del fluido a través de la tubería del captador. Hemos de recordar que el fluido que sale del captador vuelve a ser recirculado de nuevo hacia su entrada produciéndose continuamente un aumento de temperatura en el mismo. El aumento de caudal que se produce aproximadamente a las 15 horas, se traduce en una disminución de la temperatura del fluido a la salida del captador que también se ve reflejado en su entrada. Cuando el caudal se estabiliza, la temperatura comienza a aumentar de nuevo uniformemente.

Resultados para el componente Sol: se representan las gráficas obtenidas para la irradiancia en W/m^2 , y la temperatura ambiente en °C.

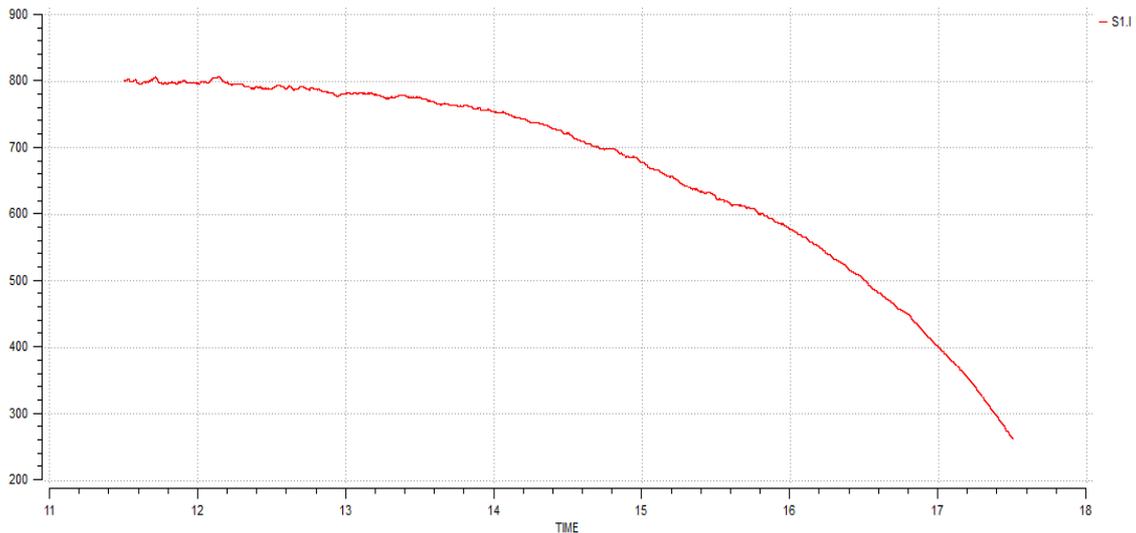


Ilustración 45. Irradiancia día 21/09/2011

Capítulo 7. Simulación y resultados del modelo

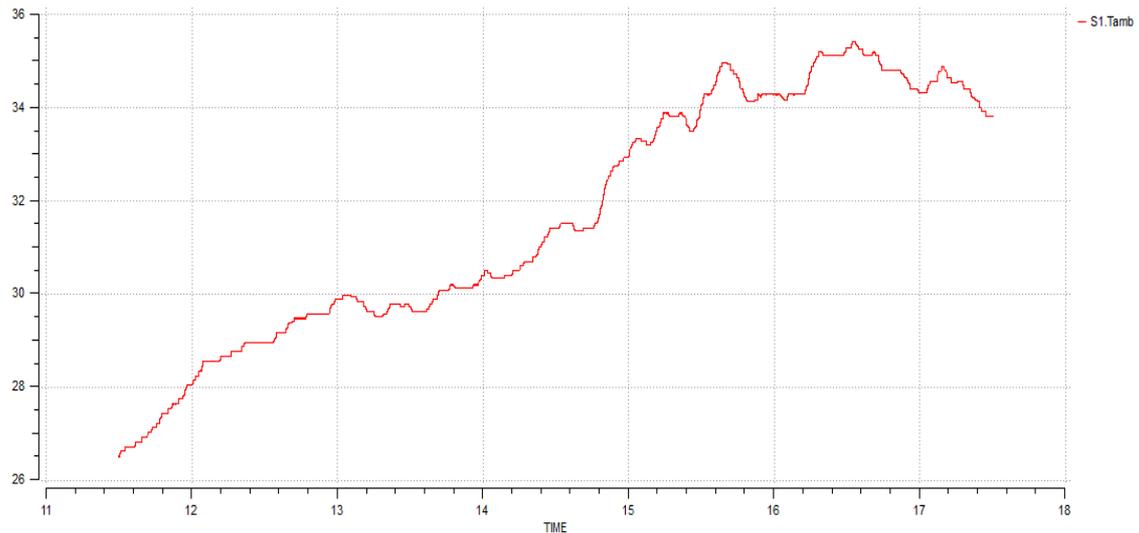


Ilustración 46. Temperatura ambiente día 21/09/2011

Como vemos en la ilustración 45, la irradiancia alcanza su valor máximo (aprox. 800 W/m^2) al comienzo de la simulación y se mantiene aproximadamente constante hasta las 13 horas, momento a partir del cual comienza a disminuir exponencialmente. Por su parte, la temperatura ambiente comienza en $26,6 \text{ }^\circ\text{C}$ y comienza a aumentar de forma irregular hasta alcanzar su valor máximo sobre las 16,50 horas.

Resultados para el componente Espejos: se muestran las gráficas obtenidas para el factor de sombra y el porcentaje de espejos enfocados en la planta a lo largo del día en tanto por 1.

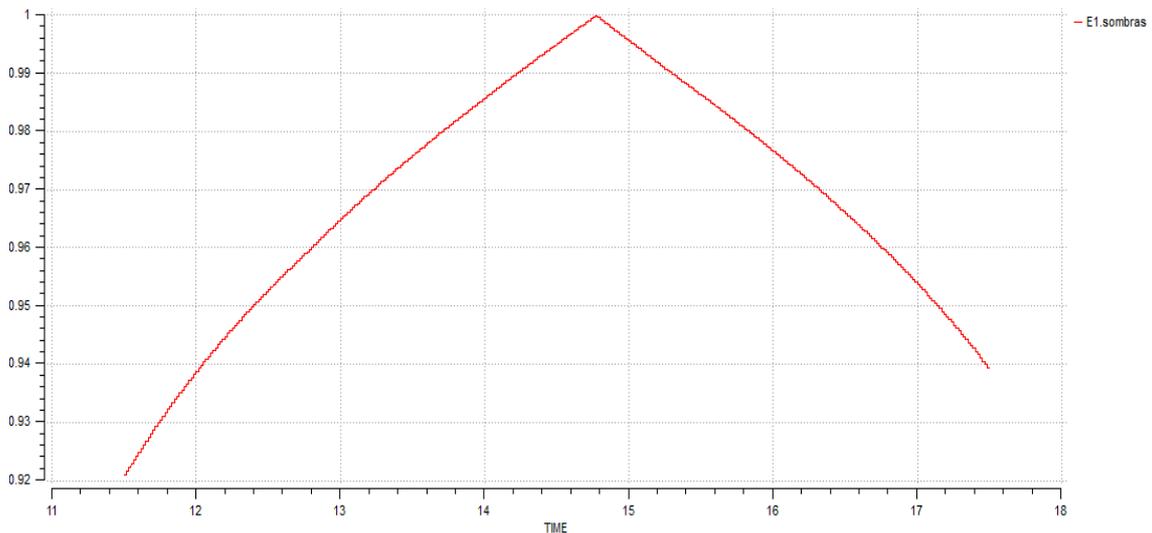


Ilustración 47. Factor de sombra día 21/09/2011

Como vemos en la ilustración, la cantidad de superficie del campo de espejos en sombra no sobrepasa nunca para este día el 10% del total. El factor de sombra, comenzará a aumentar progresivamente hasta alcanzar prácticamente el valor 1 en torno a las 14,75 horas, momento en el cual podemos decir que toda la superficie del campo de espejos está libre de sombras. A partir de ese momento, el factor de sombra comienza de nuevo a disminuir, pero nunca se alcanza un valor por debajo del 0,9. Por

otro lado, como se muestra en la ilustración 48, todos los espejos del campo se mantienen enfocados a la tubería durante el transcurso de toda la simulación.

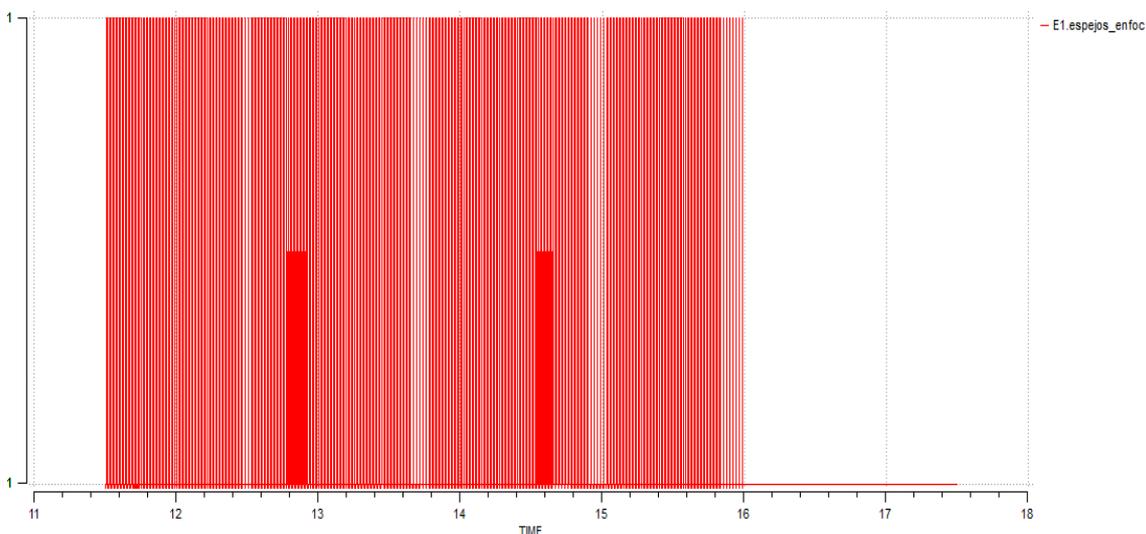


Ilustración 48. Porcentajes de espejos enfocados día 21/09/2011

La siguiente ilustración muestra el visor de variables del monitor creado para este componente con los parámetros que podemos modificar, pestaña “Inputs”, y las variables que podemos seguir, pestaña “View”.

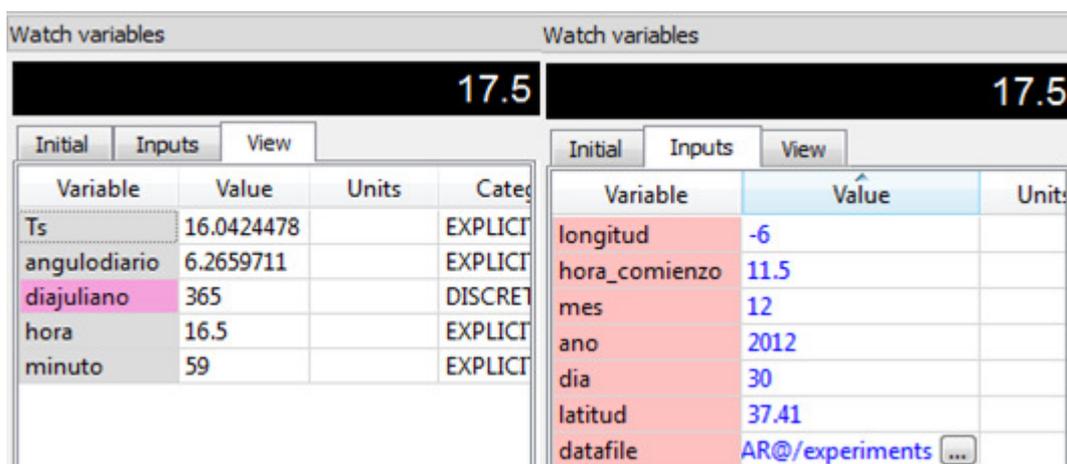


Ilustración 49. Visor de variables componente Espejos

Si cambiamos en la pestaña “Inputs” del visor, los parámetros correspondientes a la fecha de la prueba, por ejemplo 30 de diciembre de 2012 y lanzamos de nuevo la simulación, observaremos que el factor de sombra va a adquirir una importancia mucho mayor en el rendimiento del sistema.

En la ilustración 50, se muestran los resultados obtenidos sobre el porcentaje de superficie de espejos libre de sombras a lo largo de este día de prueba. Como vemos, sólo entre las 13 y 14 horas, la superficie de espejos libre de sombras sobrepasa el noventa por ciento, y a partir de las 14,20 horas, ésta empieza a decrecer rápidamente hasta alcanzar valores en torno al sesenta por ciento.

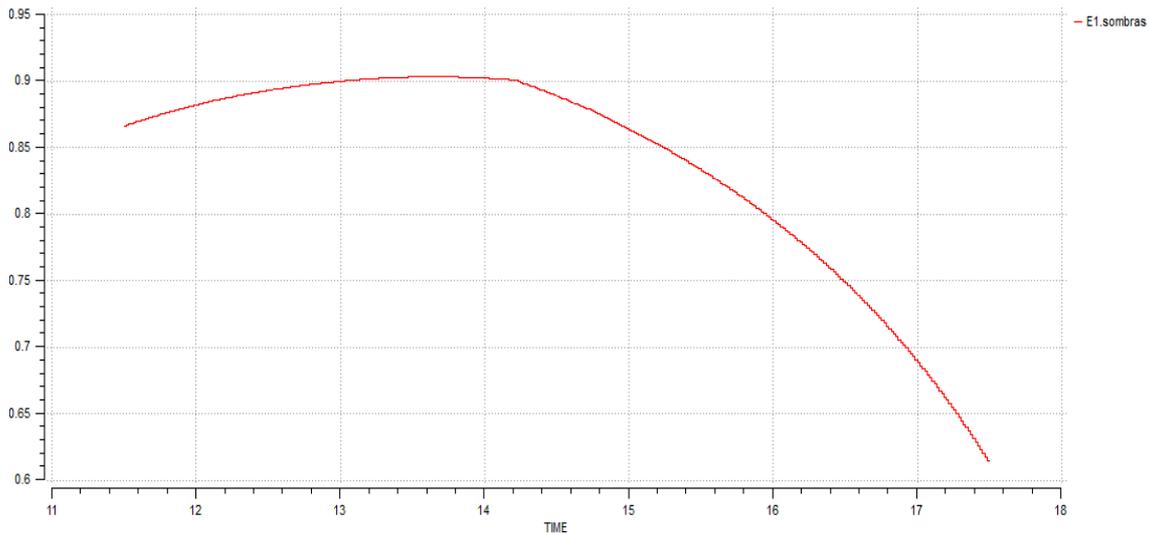


Ilustración 50. Factor de sombra día 30/12/2012

El parámetro factor de sombra resulta por tanto de gran utilidad, a la hora de elegir mejor las horas del día en las que la planta debería estar en funcionamiento en relación a las fechas en las que nos encontremos. Por ejemplo, en los casos estudiados, para el 21 de septiembre, la planta puede funcionar sin problemas desde las 11,5 horas hasta las 17,5 horas, sin embargo, para el día 30 de diciembre, el rendimiento es mucho menor a partir de las 16 horas pudiendo resultar no rentable mantener la planta en funcionamiento tanto tiempo ya que se pierde más del 20 por ciento de la superficie de espejos por efecto de las sombras.

7.2.2. Simulación del modelo completo

Ya hemos visto en el apartado anterior las simulaciones referentes a las condiciones en las que va a funcionar el colector solar y que son fijadas mediante los componentes *Entrada_Flujo*, *Sol* y *Espejos*. El último paso es simular ya el componente final *Campo_Solar*, que contiene los componentes anteriores conectados al componente principal *TUB_CAPTADOR*, más los componentes *Configuración_TUB*, para fijar las características físicas y de eficiencia del tubo absorbedor, y el componente *Salida_Flujo*, para comparar los resultados con los datos reales y obtener el error acumulado.

La siguiente ilustración, muestra la ventana del Monitor en EcosimPro, para el experimento realizado sobre el componente *Campo_Solar*. En el centro, se observan todas las gráficas con la evolución a lo largo del día de prueba de las variables y resultados más significativos del modelo. Aparecen las gráficas de entrada al sistema que reflejan el caudal, la temperatura ambiente, la irradiancia y el porcentaje de espejos enfocados. También se presenta el resultado del cálculo del Factor de sombra para ese día, una gráfica comparativa con las temperaturas de entrada del fluido al captador, de salida del fluido según el modelo y la salida de temperatura real, y por último el valor de la Integral del valor Absoluto del Error ponderado en el Tiempo, ITAE.



Ilustración 51. Salida del Monitor para experimento sobre Campo_Solar

En la columna “Watch variables” (Ilustración 52), pestaña “Inputs”, podemos modificar a lo largo de la simulación los datos y parámetros configurables del modelo tales como: ficheros de datos reales, orientación de la planta, número de segmentos en los que se divide el tubo absorbedor y longitud de los mismos, fecha de la prueba y hora de comienzo ... En la pestaña “View”, podemos ver los valores que toman otras variables del modelo que no han sido representadas de forma gráfica pero que resultan de interés como los correctores de irradiancia y caudal, eficiencia media, porcentaje de espejos enfocados, datos del modelo óptico...

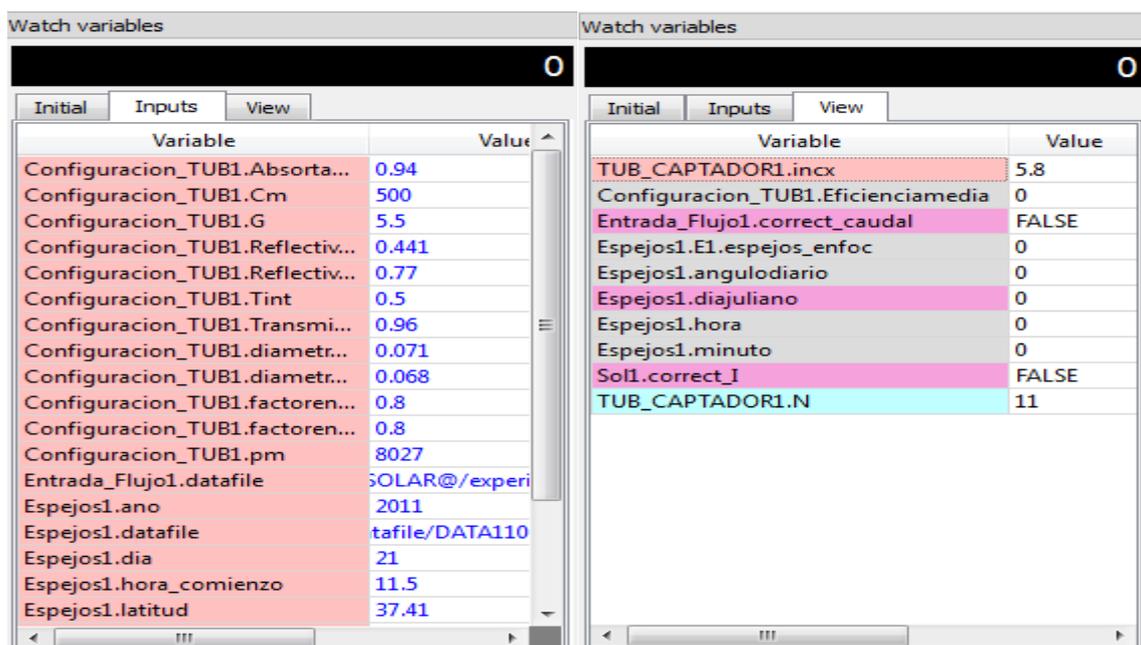


Ilustración 52. Modificación de parámetros y seguimiento de variables durante la simulación

Vamos a ver a continuación cual es la respuesta del captador solar ante datos reales de la planta tomados en dos días diferentes. Se ha simulado el proceso y se ha realizado un análisis comparativo de los resultados obtenidos a la salida del captador mediante la simulación y los datos reales de los que se dispone.

El comienzo de todas las simulaciones se produce a las 11.50 y termina a las 17.50 horas.

Resultados obtenidos para el día 21/09/2011

En primer lugar se van a exponer los resultados obtenidos del modelo para el día 21 de Septiembre de 2011. Las condiciones iniciales tomadas para las temperaturas del metal y del fluido en los distintos tramos de tubería son de 66.05 y 59.05 °C respectivamente en todos ellos.

Se realizará primero la simulación para un total de 64 segmentos de 1 metro de longitud cada uno, variando posteriormente el grado de discretización para ver como afecta al resultado del modelo.

Simulación para 64 segmentos de 1 metro de longitud cada uno

La siguiente figura muestra la gráfica comparativa de temperaturas: temperatura de salida del modelo (azul), temperatura de salida real (rojo) y temperatura de entrada (verde).

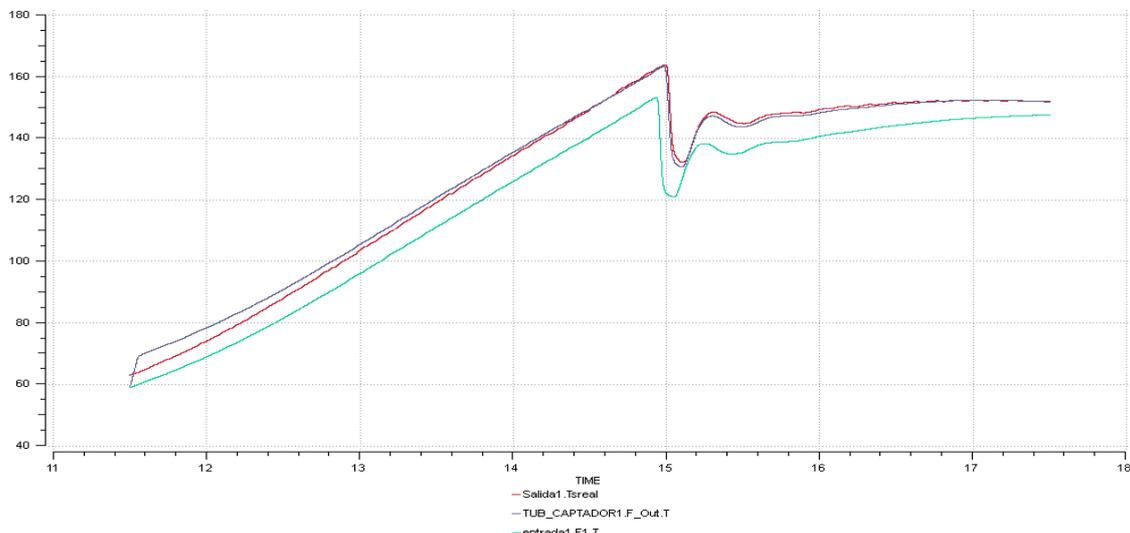


Ilustración 53. Análisis comparativo de temperaturas 21/09/2011: temperatura real de entrada (verde), temperatura de salida del modelo (azul) y temperatura real de salida (rojo)

Vemos como la temperatura de salida del modelo inicialmente comienza por encima de la temperatura real de salida, pero a medida que avanza el tiempo tiende a ésta última siendo finalmente ambas prácticamente iguales. La diferencia inicial se debe a que las condiciones iniciales impuestas para la temperatura del metal y del fluido en los segmentos de la tubería (66.05 y 59.05 °C respectivamente) no coinciden con las temperaturas reales en cada segmento en el instante de comienzo de la simulación. De

hecho, se supone una distribución uniforme de temperaturas en los segmentos, lo cual, no va a coincidir evidentemente con la realidad.

Por otro lado, se observa también como el modelo reacciona prácticamente del mismo modo que en la realidad ante una perturbación en el sistema como puede ser un aumento repentino de caudal de entrada (Ilustración 44). Al igual que en el caso real, la temperatura de salida empieza a descender de forma brusca hasta que pasado un tiempo, se estabiliza y comienza de nuevo a ascender de manera moderada siguiendo a la temperatura real.

Veamos a continuación la gráfica de salida correspondiente al error absoluto acumulado y ponderado en el tiempo (ITAE) que se obtiene para este día, Ilustración 54, en el caso de que empleemos 64 segmentos.

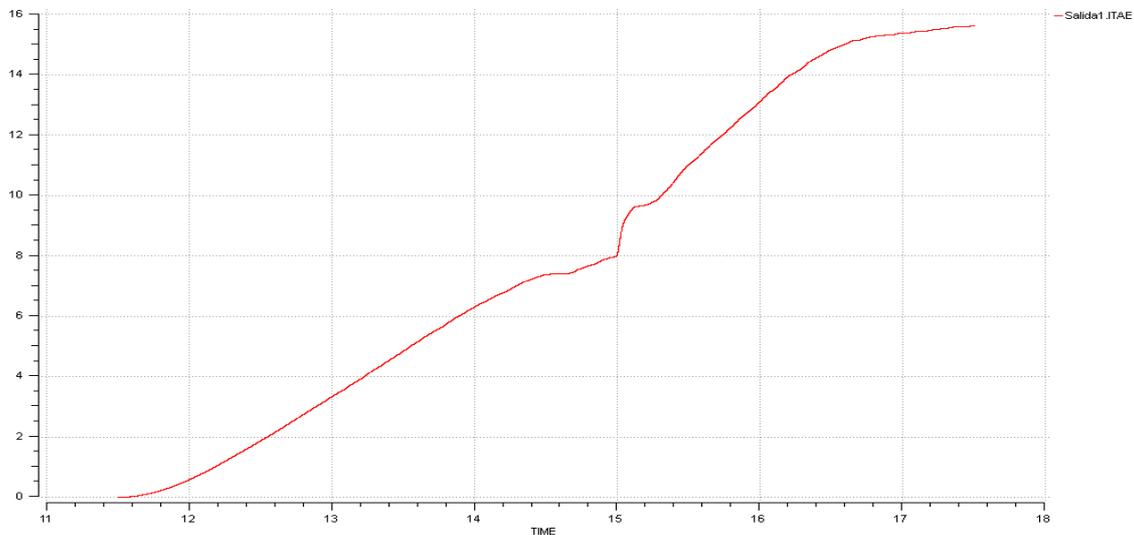


Ilustración 54. ITAE para el día 21/09/2011 y N=64

Como observamos en la gráfica, el error acumulado en la temperatura de salida entre el modelo y la realidad a lo largo de todo el día de prueba, no sobrepasa los 16 °C. El error cometido en las primeras horas de la simulación, debido a que las condiciones iniciales de temperatura impuestas para el metal y el fluido no coinciden con las reales, se ve atenuado por la propia definición de ITAE (ecuación 6, apartado 6.2.2), que otorga menos valor a los errores producidos al comienzo de la simulación, a veces inevitables como es este caso, en el que no conocemos las condiciones iniciales en los segmentos del tubo absorbedor. Por el contrario, cuanto más avancemos en el tiempo de la simulación, el error que persiste entre la temperatura de salida del modelo y la real, va adquiriendo mayor importancia en el cálculo del ITAE, incrementado mucho más su valor.

Si observamos detenidamente la gráfica, vemos que pasado el error inicial, en torno a las 14,30 horas, el valor del ITAE comienza a estabilizarse. Sin embargo, en ese momento, se introduce la perturbación en el caudal y el error acumulado se incrementa de forma brusca en torno a dos grados, para después seguir aumentando de forma más moderada. Finalmente, cuando el modelo vuelve a estabilizarse en torno a las 16,30

horas, el valor del ITAE vuelve a ser prácticamente constante, no existiendo diferencias entre la temperatura de salida del fluido dada por el modelo y la temperatura de salida real del captador.

Los resultados vistos anteriormente corresponden a una discretización del tubo absorbedor de 64 segmentos de un metro de longitud cada uno. El que se hayan tomado 64 segmentos no es casual, sino que es un valor de compromiso entre la exactitud de los cálculos y el tiempo de computación empleado para obtenerlos.

Se representan a continuación las gráficas del ITAE obtenidas para el mismo día, pero variando el número de segmentos y por tanto la longitud de los mismos.

Simulación para 16 segmentos de 4 metros de longitud cada uno

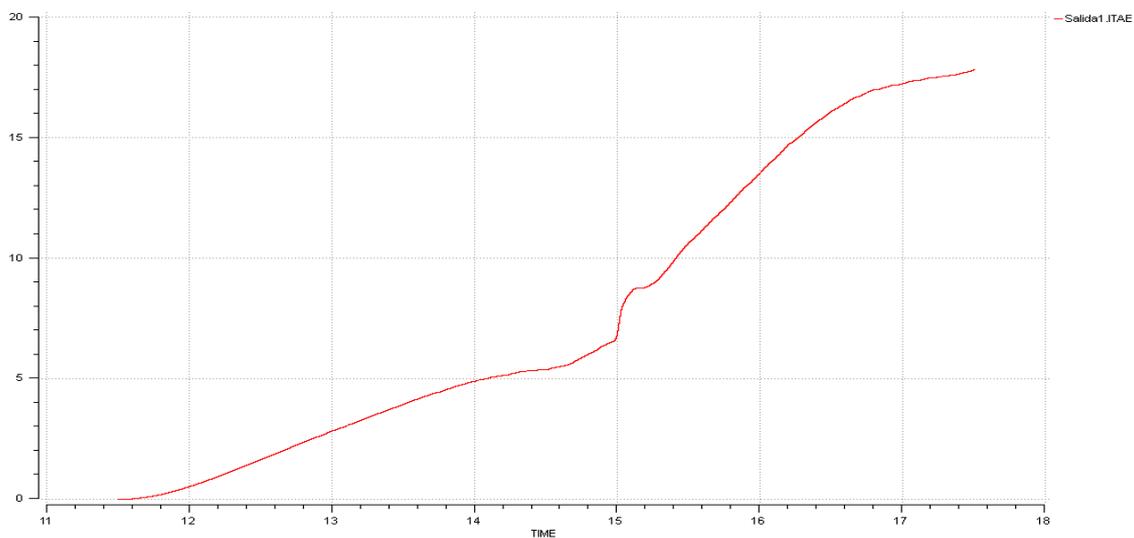


Ilustración 55. ITAE para el día 21/09/2011 y N=16

Simulación para 32 segmentos de 2 metros de longitud cada uno

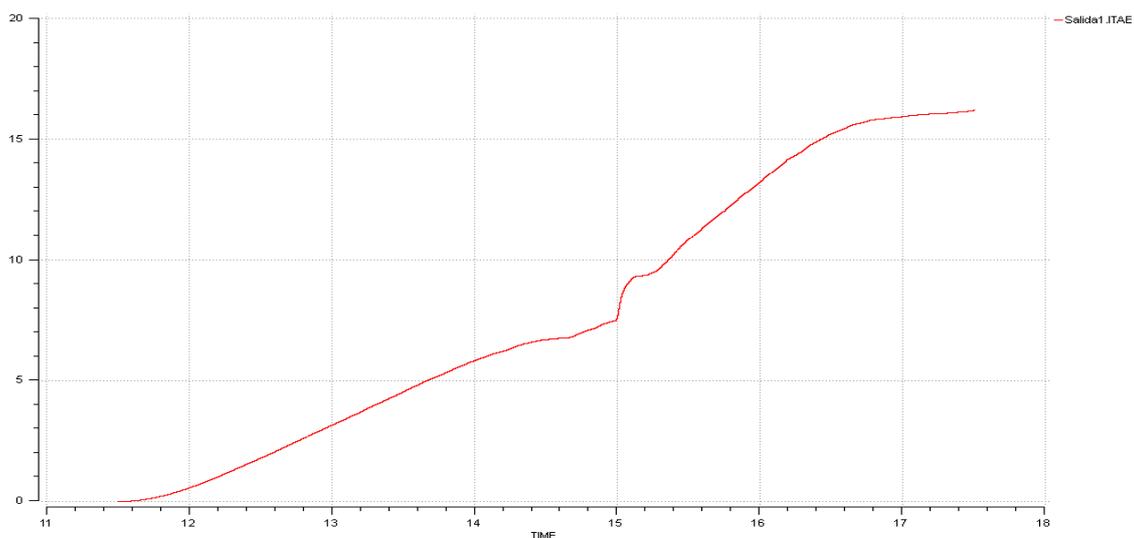


Ilustración 56. ITAE para el día 21/09/2011 y N=32

Simulación para 128 segmentos de 0,5 metros de longitud cada uno

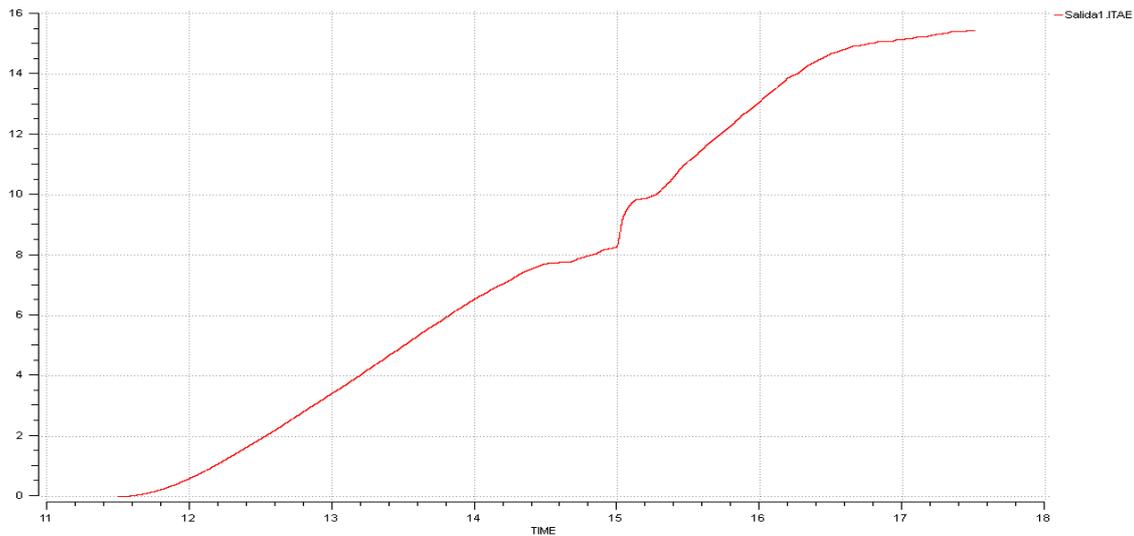


Ilustración 57. ITAE para el día 21/09/2011 y N=128

Analizamos los resultados obtenidos en las gráficas anteriores. En la primera de ellas (Ilustración 55), para 16 segmentos de 4 metros de longitud cada uno, el error integral acumulado alcanza prácticamente los 18 °C al final de la simulación. En la siguiente (Ilustración 56), para N=32, el ITAE se reduce aproximadamente 2 °C llegando a un valor muy similar aunque algo por encima del obtenido para N=64 (Ilustración 54). En la última gráfica (Ilustración 57), a pesar de que se ha doblado el número de segmentos, 128, reduciendo su longitud a la mitad, 0,5 metros, se obtiene una mejora de apenas medio grado centígrado en el error acumulado.

Podemos concluir entonces que, como era de esperar, el nivel de discretización del tubo absorbedor influye en el error cometido por el modelo. A medida que aumentamos el número de segmentos N , disminuyendo al mismo tiempo la longitud de los mismos, el error acumulado durante el día de prueba disminuye. Por ejemplo, si duplicamos los segmentos de 16 a 32, se reduce el error cometido en un 12,5%. Sin embargo, a partir de un cierto número de segmentos, no obtenemos una mejora visible en el índice ITAE al seguir aumentando el nivel de discretización. Así, si pasamos de 64 segmentos a 128, la mejora en el error es apenas imperceptible (medio grado a lo largo de todo el día), y sin embargo, los tiempos de computación necesarios para obtener los resultados se disparan como consecuencia del incremento en el número de ecuaciones y variables del modelo.

Por tanto, tomaremos como valor óptimo de discretización del tubo absorbedor el de 64 segmentos de 1 metro de longitud cada uno, por resultar un valor de compromiso entre la exactitud del modelo y los tiempos de computación empleados para realizar la simulación de un día completo.

Resultados obtenidos para el día 16/09/2011

Se mostrarán las gráficas correspondientes al caudal de entrada, comparativa de temperaturas entre el modelo y el sistema real y evolución del ITAE. No se muestran otras variables como el Factor de Sombra o la Irradiancia, por ser prácticamente similares a las del día 21. También se ha hecho coincidir nuevamente las temperaturas iniciales del fluido y del metal para cada segmento con la temperatura inicial de entrada del fluido 64,77 °C para el primer caso, y 7 °C más para el metal, realizando una distribución uniforme en todos los segmentos.

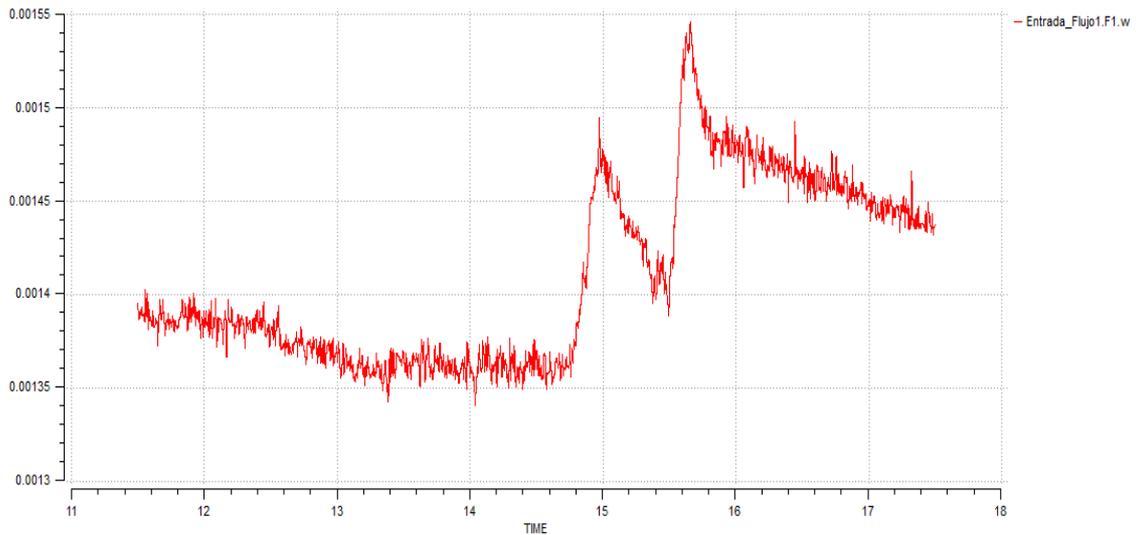


Ilustración 58. Caudal de entrada de fluido día 16/09/2011

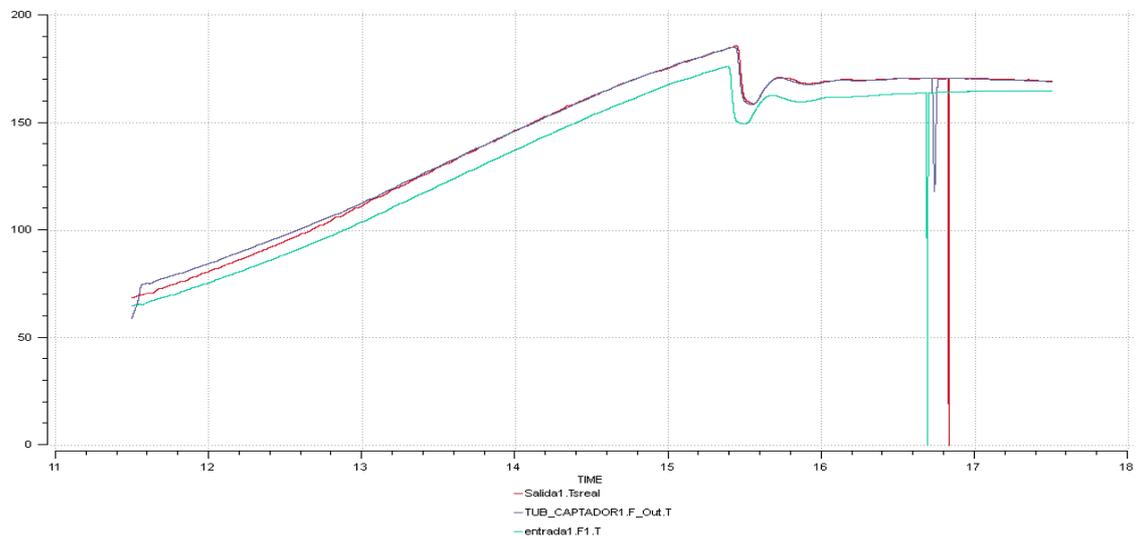


Ilustración 59. Análisis comparativo de temperaturas 16/09/2011: temperatura real de entrada (verde), temperatura de salida del modelo (azul) y temperatura real de salida (rojo)

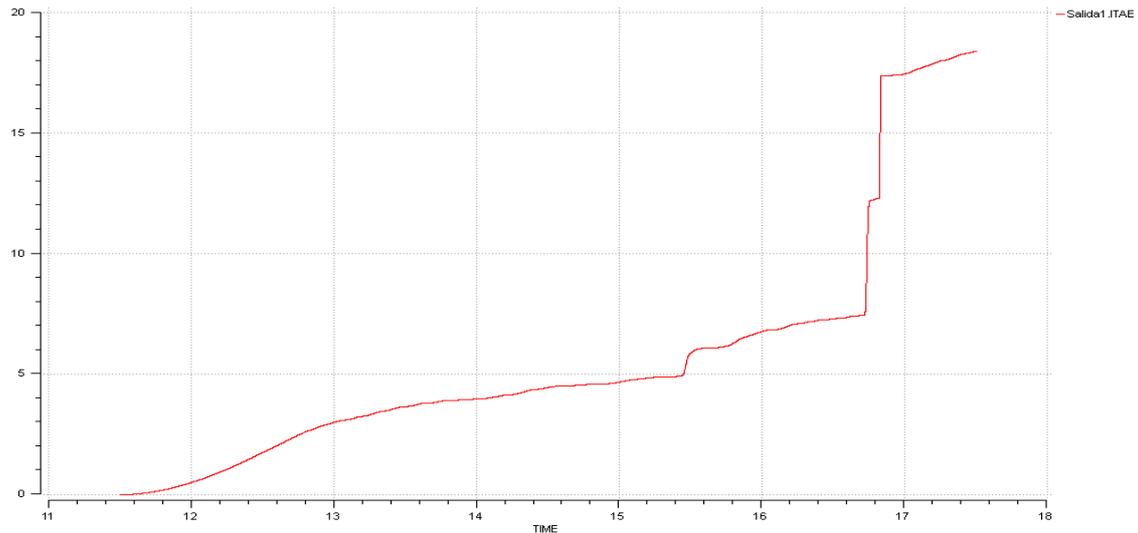


Ilustración 60. ITAE para el día 16/09/2011 y N=64

Como se puede ver en las gráficas anteriores, para este día se observa un comportamiento del modelo similar al del día 21. De nuevo, el incremento mayor del error (en trono a 10 °C), se produce en torno a las 16,80 horas, cuando se detecta una caída brusca de la temperatura del fluido de entrada. Al producirse el error prácticamente al final de la simulación, el aumento en el ITAE es mucho mayor debido a que la diferencia de tiempos con respecto a la hora de inicio de la simulación es bastante elevada. Por otro lado, en este caso vemos mejor como el modelo se anticipa en su respuesta de salida a la respuesta real del sistema cuando se produce el descenso brusco de temperatura.

Se han realizado también simulaciones para otros dos días más sin observar comportamientos diferentes a los ya expresados. Los ficheros de datos de todos los días de prueba se encuentran en el CD del proyecto, dentro de la carpeta *Datafile*.