

Trabajo de Fin de Máster
Máster Universitario en Sistemas de Energía Térmica

Simulación dinámica y evaluación de una instalación
de energía solar térmica para producción de agua
caliente sanitaria en un hotel

Autor: Matías Manuel Montes

Tutor: José Julio Guerra Macho
Francisco Javier Pino Lucena

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Máster
Máster Universitario en Sistemas de Energía Térmica

Simulación dinámica y evaluación de una instalación de energía solar térmica para producción de agua caliente sanitaria en un hotel

Autor:

Matías Manuel Montes

Tutor:

José Julio Guerra Macho
Catedrático de Universidad

Francisco Javier Pino Lucena
Profesor Titular de Universidad

Departamento Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo de fin de Máster: Simulación dinámica y evaluación de una instalación de energía solar térmica para producción de agua caliente sanitaria en un hotel

Autor: Matías Manuel Montes

Tutor: José Julio Guerra Macho
Francisco Javier Pino Lucena

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis amigos y colegas
A mi tutor y colaboradores

Agradecimientos

La ayuda de mi familia para poder realizar un master siendo esta una etapa superadora de mi carrera profesional, por estar siempre presentes de todas las maneras posibles. A mis compañeros por siempre tener la predisposición de contribuir y mejorar cada día junto a mí.

A mi asesor, José Guerra por su preocupación, dedicación y siempre enseñarme el camino a seguir con este proyecto, al cual le guardo un gran aprecio. A los colaboradores Javier Pino y Alan que tuvieron siempre la mejor predisposición y colaboración para lo respectivo a la etapa de simulación del presente proyecto.

*Matías Manuel Montes
Sevilla, 2020*

Resumen

La visión vinculada a la innovación e incorporación de energía renovable es en Europa un avance sin precedentes hacia un desarrollo sustentable y de carácter ejemplar para el resto del mundo. Siendo la energía termosolar un bastión de mejora en la eficiencia energética de las edificaciones.

En el presente proyecto se simula dinámicamente el comportamiento de una instalación de captadores solares y sistema convencional para la producción de agua caliente sanitaria de un hotel y se evalúa de forma paramétrica su comportamiento. La simulación se realiza mediante TRNSYS.

Abstract

The vision linked to the innovation and incorporation of renewable energy is in Europe an unprecedented advance towards sustainable development and of an exemplary nature for the rest of the world. Being the solar thermal energy an inflection point of improvement in the energy efficiency of buildings.

This project aims to assess parametrically and simulate the behavior of an installation of solar collectors and auxiliary systems for the production of domestic hot water in a hotel. This procedure is performed using software called TRNSYS.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	La radiación solar	1
1.3	Energía solar Térmica	2
1.4	Energía solar térmica de baja temperatura	3
1.5	Producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS)	4
1.6	Sistemas de energía solar para ACS	5
1.7	Descripción de un captador solar plano	11
1.8	Antecedentes y objeto	13
2	TRNSYS y el análisis de ficheros	14
2.1	Introducción.....	14
2.2	Descripción de TRNSYS.....	14
2.3	Aproximación en el modelado de componentes.....	16
2.4	Creación de sistemas complejos.....	16
2.5	Escalas de tiempo contempladas.....	17
2.6	Paso de tiempo	17
2.7	Librerías de modelos y creación de modelos	18
2.8	Modificación y creación de componentes.....	19
2.9	Entorno del software	19
2.10	Estructura interna del programa.....	19
2.11	El motor de cálculo o “solver” de TRNSYS	21
2.12	Descripción de unidades utilizadas para la simulación	22
3	Modelado y simulación en TRNSYS.....	36
3.1	Introducción.....	36
3.2	Definición del edificio.....	36
3.3	Esquema de la instalación	39
3.4	Captación solar y acumulación solar.....	39
3.5	Sistema auxiliar.....	40
3.6	Modelado	41
3.7	Análisis de gráficas	47

3.8	Curvas del caso base.....	50
3.9	Evaluación de la evolución temporal de f.....	67
3.10	Evaluación del caso base	67
3.11	Análisis paramétrico.....	69
3.12	Resultados del análisis paramétrico	76
4	Conclusiones	78
4.1	Introducción.....	78
4.2	Resumen.....	78
4.3	Proyectar en TRNSYS	78
4.4	Conclusiones.....	79
5.	Referencias	81
5.1.	Referencias.....	81

Índice de Figuras

<i>Figura 1-1 Clasificación de tecnologías de conversión de la energía solar (2)</i>	2
<i>Figura 1-2 Captadores solares planos</i>	3
<i>Figura 1-3 Instalación solar térmica de baja temperatura (3)</i>	4
<i>Figura 1-4 Instalación de ACS con captadores solares (8)</i>	5
<i>Figura 1-5 Clasificación de los sistemas de energía solar para ACS (3)</i>	5
<i>Figura 1-6 Esquema de un sistema de energía solar para ACS por termosifón (3)</i>	6
<i>Figura 1-7 Ventajas, desventajas y aplicaciones del sistema de termosifón (3)</i>	7
<i>Figura 1-8 Ejemplo de un sistema simple de circulación forzada (3)</i>	7
<i>Figura 1-9 Ventajas, desventajas y aplicaciones de sistemas de circulación forzada (3)</i>	8
<i>Figura 1-10 Configuraciones de instalación de energía solar para ACS con auxiliar (3)</i>	9
<i>Figura 1-11 Norma que prohíbe colocar el auxiliar dentro del acumulador solar (3)</i>	9
<i>Figura 1-12 Configuración con auxiliar y caudal compensatorio para ACS (3)</i>	10
<i>Figura 1-13 Configuraciones con múltiples puntos de consumo (3)</i>	10
<i>Figura 1-14 Elementos de un captador solar plano (2)</i>	12
<i>Figura 2-1 Logo del software TRNSYS (9)</i>	14
<i>Figura 2-2 Subrutinas que constituyen TRNSYS, contenidas en TRNSYS.DLL (7)</i>	20
<i>Figura 2-3 Estructura global de TRNSYS. (7)</i>	21
<i>Figura 2-4 Discretización del periodo de simulación con paso de tiempo constante (7)</i>	22
<i>Figura 2-5 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 9</i>	23
<i>Figura 2-6 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 33d</i>	24
<i>Figura 2-7 Variables de salida del fichero TYPE16c</i>	24
<i>Figura 2-8 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 16c</i>	25
<i>Figura 2-9 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 1b</i>	26
<i>Figura 2-10 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 31</i>	26
<i>Figura 2-11 Variables de salida del fichero TYPE4a</i>	27
<i>Figura 2-12 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 4a</i>	27
<i>Figura 2-13 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 114</i>	28
<i>Figura 2-14 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 2b</i>	29
<i>Figura 2-15 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 14a</i>	29
<i>Figura 2-16 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 14h</i>	30
<i>Figura 2-17 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 11b</i>	31
<i>Figura 2-18 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 11h</i>	31
<i>Figura 2-19 Parámetros del fichero TYPE6</i>	32
<i>Figura 2-20 Variables de entrada del fichero TYPE6</i>	32
<i>Figura 2-21 Variables de salida del fichero TYPE6</i>	32
<i>Figura 2-22 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 6</i>	32
<i>Figura 2-23 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 5b</i>	33
<i>Figura 2-24 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 24</i>	33
<i>Figura 2-25 Relación de variables de entrada y salida del operador de Ecuaciones</i>	34
<i>Figura 2-26 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 65d</i>	35
<i>Figura 2-27 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 25c</i>	35
<i>Figura 3-1 Ubicación del hotel Guadacorte, Los barrios, Cádiz, España</i>	36
<i>Figura 3-2 Vista satelital del Hotel Guadacorte</i>	37
<i>Figura 3-3 Plazas disponibles en hotel Guadacorte (6)</i>	37
<i>Figura 3-4 Perfil de valores de ocupación por mes del hotel Guadacorte</i>	38
<i>Figura 3-5 Valor seleccionado de consumos de agua caliente por persona (4)</i>	38
<i>Figura 3-6 Esquema general simplificado de la instalación</i>	39

<i>Figura 3-7 Tabla de características de los captadores termosolares</i>	40
<i>Figura 3-8 Distribución de captadores termosolares para el hotel Guadacorte (6)</i>	40
<i>Figura 3-9 Disposición completa de todos los elementos del sistema de ACS en TRNSYS</i>	41
<i>Figura 3-10 Cuadro de líneas de referencia del diagrama de TRNSYS</i>	42
<i>Figura 3-11 Representación de los ficheros del Grupo 1 y del Grupo 2</i>	43
<i>Figura 3-12 Configuración del procesador de cálculo para establecer la demanda de ACS</i>	44
<i>Figura 3-13 Ficheros del sistema primario</i>	44
<i>Figura 3-14 Ficheros del sistema secundario</i>	45
<i>Figura 3-15 Ficheros del grupo 3</i>	47
<i>Figura 3-16 Evolución de la temperatura ambiente</i>	47
<i>Figura 3-17 Evolución de la temperatura del agua de entrada de la red de agua</i>	48
<i>Figura 3-18 Ocupación del edificio</i>	48
<i>Figura 3-19 Perfil de consumo diario de ACS</i>	49
<i>Figura 3-20 Demanda anual de ACS</i>	49
<i>Figura 3-21 Parámetros del fichero Type1b</i>	50
<i>Figura 3-22 Variables de entrada del fichero Type1b</i>	50
<i>Figura 3-23 Parámetros del fichero TYPE2b</i>	51
<i>Figura 3-24 Variables de entrada del fichero TYPE2b</i>	51
<i>Figura 3-25 Parámetros del fichero TYPE4a</i>	51
<i>Figura 3-26 Parámetros del fichero TYPE4a (continuación)</i>	52
<i>Figura 3-27 Variables de entrada del fichero TYPE4a</i>	52
<i>Figura 3-28 Parámetros del fichero TYPE11b</i>	52
<i>Figura 3-29 Variables de entrada del fichero TYPE11b</i>	53
<i>Figura 3-30 Parámetros del fichero TYPE6</i>	53
<i>Figura 3-31 Variables de entrada del fichero TYPE6</i>	53
<i>Figura 3-32 Variables de entrada del fichero TYPE5b</i>	53
<i>Figura 3-33 Parámetros del fichero TYPE2b</i>	54
<i>Figura 3-34 Variables de entrada del fichero TYPE2b</i>	54
<i>Figura 3-35 Variables de entrada del fichero TYPE4a</i>	54
<i>Figura 3-36 Parámetros del fichero TYPE4a</i>	55
<i>Figura 3-37 Configuración del entorno de TRNSYS</i>	55
<i>Figura 3-38 Evolución de la temperatura del agua a la salida del captador solar</i>	56
<i>Figura 3-39 Evolución de la temperatura de la salida del auxiliar</i>	56
<i>Figura 3-40 Evolución de la temperatura de salida de agua del tanque primario</i>	57
<i>Figura 3-41 Temperatura de la salida de agua del tanque del secundario</i>	57
<i>Figura 3-42 Temperatura del ACS para el consumo del edificio</i>	58
<i>Figura 3-43 Caudal del sistema primario</i>	58
<i>Figura 3-44 Caudal del circuito primario del sistema secundario (circuito del auxiliar)</i>	59
<i>Figura 3-45 Caudal del circuito secundario del sistema secundario</i>	59
<i>Figura 3-46 Caudal de compensación de agua fría que sale de la Tee tempering valve</i>	60
<i>Figura 3-47 Evolución de las temperaturas del sistema el día 4 de enero</i>	60
<i>Figura 3-48 Evolución de los caudales del sistema el día 4 de enero</i>	61
<i>Figura 3-49 Integración de caudales y temperaturas evaluadas para el día 4 de enero</i>	62
<i>Figura 3-50 Evolución de las temperaturas del sistema para el día 10 de abril</i>	62
<i>Figura 3-51 Evolución de los caudales del sistema para el día 10 de abril</i>	63
<i>Figura 3-52 Integración de caudales y temperaturas evaluadas para el día 10 de abril</i>	63
<i>Figura 3-53 Evolución de las temperaturas del sistema para el día 11 de julio</i>	64
<i>Figura 3-54 Evolución de los caudales del sistema para el día 11 de julio</i>	64
<i>Figura 3-55 Integración de caudales y temperaturas evaluadas para el día 11 de julio</i>	65
<i>Figura 3-56 Evolución de las temperaturas del sistema para el día 16 de octubre</i>	65
<i>Figura 3-57 Evolución de los caudales del sistema para el día 16 de octubre</i>	66
<i>Figura 3-58 Integración de caudales y temperaturas evaluadas para el día 16 de octubre</i>	66
<i>Figura 3-59 Evolución de f %, de la energía solar captada y del sistema auxiliar</i>	67
<i>Figura 3-60 Valor de f % en función de la superficie de captación en m²</i>	70
<i>Figura 3-61 Valor de f % en función de la relación volumen acumulación / superficie captación</i>	71
<i>Figura 3-62 Descripción de la variable Azimuth of surface del fichero TYPE16c</i>	72

<i>Figura 3-63 Puntos cardinales con sus asignaciones en grados según establece TRNSYS</i>	72
<i>Figura 3-64 Valor de f en función de la orientación de los captadores</i>	73
<i>Figura 3-65 Valor de f % en función de la inclinación en $^{\circ}$ respecto de la horizontal</i>	74
<i>Figura 3-66 Valor de f % en función del Aumento de ocupantes</i>	75
<i>Figura 3-67 Tabla de características del caso base</i>	75
<i>Figura 3-68 Valor de f % del caso base</i>	75

1 Introducción

“ignoro la razón por la cual, en nuestro sistema, solo hay un cuerpo capaz de dar luz a todo lo demás; pero así lo dispuso el autor del sistema, por considerarlo lo más acertado”

-Sir Isaac Newton refiriéndose al sol-

1.1 Introducción

En el presente capítulo introduciremos un marco teórico referido a la radiación solar, como son los sistemas para aprovechar su energía y haremos un apartado especial para el tipo de captador solar en el presente proyecto. Se busca entonces introducir al lector en los conceptos previos para identificar los parámetros que influyen en el sistema.

1.2 La radiación solar

La radiación solar que incide en la superficie terrestre es suficiente para suministrar las necesidades de energía primaria en el mundo.

La radiación solar interceptada por la atmósfera terrestre es aproximadamente en valores promedios de $1,3 \text{ kW/m}^2$. Pero debido a los fenómenos de reflexión hacia el espacio, la radiación máxima que incide en la superficie terrestre es de 1 kW/m^2 aproximadamente.

La radiación solar está limitada por:

- Variaciones estacionales
- Diurnas
- Geográficas
- Condiciones atmosféricas

La radiación solar como recurso energético es por tanto una energía de baja densidad, no controlable, **generalmente desacoplada del consumo**. Sin embargo, es una energía gratuita (no la tecnología para su utilización), descentralizada, a “libre” disposición de los potenciales usuarios y que no da lugar a un calentamiento adicional de la atmósfera terrestre.

La conversión de la energía solar en energía útil, como energía térmica o energía eléctrica, tiene limitaciones técnicas (rendimiento y nivel térmico necesario), económicas frente a las tecnologías convencionales y espaciales relacionadas con la superficie necesaria.

En cualquier caso, el potencial de la energía solar es mucho mayor que el de otras fuentes de energías renovables como la eólica, biomasa, geotérmica o mareomotriz. (Guerra Macho J. J., 2018)

1.3 Energía solar Térmica

En la actualidad las tecnologías para la utilización de la energía solar pueden ser muy diferentes; desde las más sencillas como las salinas o el secado solar de granos hasta las más específicas como son las tecnologías de conversión directa de la radiación solar en electricidad en captadores fotovoltaicos.

En todos los casos el principio físico de la conversión térmica de la radiación solar es siempre el mismo: un dispositivo capta la radiación solar incidente y la transfiere a un fluido caloportador. Este fluido se puede utilizar directamente como es el caso de una piscina o indirectamente a través de un intercambiador de calor para calentar un proceso o generar electricidad.

Los sistemas de conversión de la energía solar se pueden clasificar según diferentes criterios en (Figura 1-1):

- a) Activos y pasivos
- b) Térmicos y fotovoltaicos
- c) Con concentración y sin concentración

	Sistemas Activos			Sistemas Pasivos
	Solar Fotovoltaica	Solar Térmica		
		Térmica	Eléctrica	
Centralizado (> 200 kW)	Centrales Fotovoltaicas	Calefacción por Distrito. Procesos industriales	Centrales Termosolares	
Distribuido gran escala (> 20 kW)	Edificios sector servicios	Calentamiento de agua en sector edificación y procesos industriales		
Distribuido pequeña escala (< 20 kW)	Edificios sector residencial	Calentamiento de agua en sector residencial		Calefacción y refrigeración edificios
Aisladas	Viviendas aisladas			Iluminación natural

Figura 1-1 Clasificación de tecnologías de conversión de la energía solar (2)

Los sistemas activos de energía solar se pueden clasificar según el nivel de temperatura del proceso en tres bloques:

- a) Aplicaciones a alta temperatura (Centrales termosolares)

b) Aplicaciones a media temperatura (Procesos industriales)

c) Aplicaciones a baja temperatura (Industria y edificación):

- Producción de agua caliente sanitaria
- Calefacción
- Refrigeración
- Piscinas
- Producción de agua caliente
- Secado

1.4 Energía solar térmica de baja temperatura

Se consideran instalaciones de energía solar térmica de baja temperatura aquellas instalaciones de energía solar térmica que proveen un calor útil a **temperaturas menores a 65°C**.

Una instalación solar térmica de baja temperatura está formada por captadores solares, dos circuitos de agua (primario y secundario), intercambiador de calor, acumulador, vaso de expansión y tuberías. (Figuras 1-2 y 1-3)

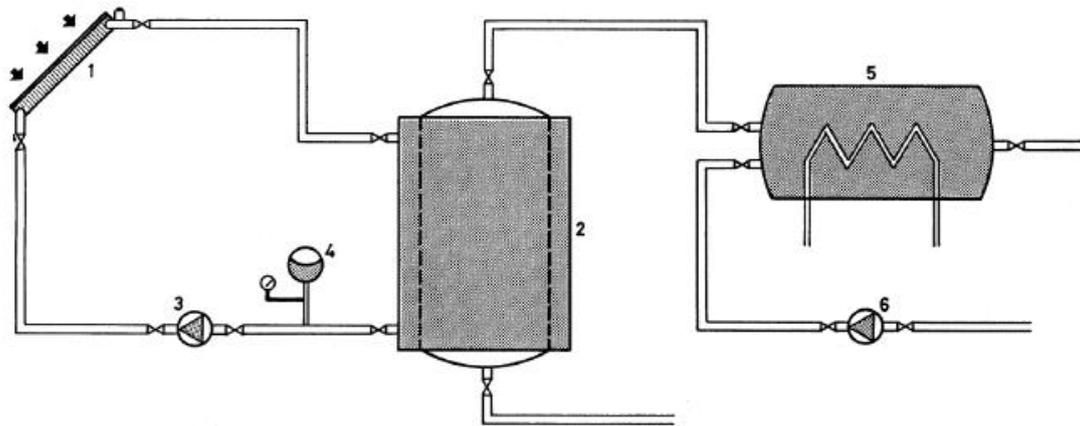


Figura 1-2 Captadores solares planos

La circulación del agua por el interior de los circuitos se puede obtener mediante termosifón, aprovechando la diferencia de densidad del agua a temperaturas distintas o mediante una bomba de circulación. Aunque con una bomba de circulación se necesita una aportación externa de energía eléctrica. (Solar-energía, 2019).

Los sistemas por termosifón se autorregulan y como no llevan bomba de circulación no se puede controlar su funcionamiento por temperatura máxima o por heladas, salvo llenando el circuito con un anticongelante. Como las fuerzas de masa son pequeñas, la pérdida de carga del circuito tiene que reducirse al máximo, trabajando con tuberías de mayor diámetro y poca longitud. Se utilizan solo en viviendas unifamiliares.

Las instalaciones de circulación forzada en cambio, no tienen ninguna limitación y se pueden controlar sin restricciones. Se utilizan en todo tipo de instalaciones, de cualquier tamaño y para cualquier tipología de edificio.



- 1: Captador solar
- 2: Depósito de acumulación
- 3: Bomba circulación circuito primario

- 4: Vaso de expansión
- 5: Sistema auxiliar
- 6: Bomba retorno ACS

Figura 1-3 Instalación solar térmica de baja temperatura (3)

1.5 Producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS)

La principal aplicación de la energía solar térmica es la producción de agua caliente sanitaria (ACS) para el sector doméstico y de servicios. El agua caliente sanitaria se usa a una temperatura de 45 grados centígrados aproximadamente.

Esta temperatura se puede alcanzar fácilmente con captadores solares planos que pueden alcanzar temperaturas del orden de 80 grados centígrados. (Figura 1-2).

El porcentaje de demanda cubierta del consumo de agua caliente sanitaria ACS anual es aproximadamente del 60 %; se habla de este porcentaje, y no superior, para que en la época de mayor radiación solar no sobre energía. La energía aportada por los captadores debe ser tal que en los meses más favorables aporte el 100 %. El resto de las necesidades que no aportan los captadores se obtiene de un sistema auxiliar, que habitualmente suele ser gasóleo, gas o energía eléctrica. Con este porcentaje de demanda cubierto los periodos de amortización son reducidos. (Solar-energía, 2019)

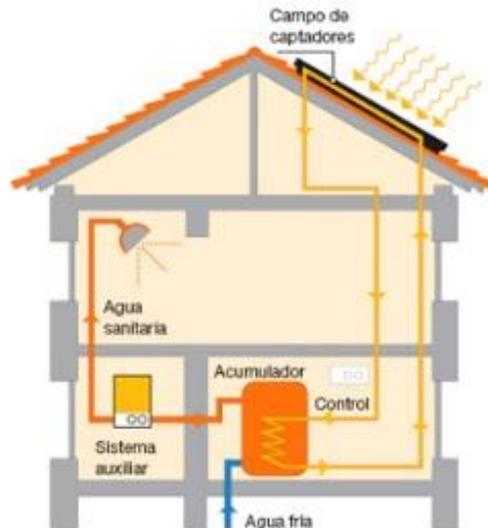


Figura 1-4 Instalación de ACS con captadores solares (8)

1.6 Sistemas de energía solar para ACS

Los sistemas de energía solar para agua caliente sanitaria (ACS) pueden clasificarse de diferentes maneras. Pero en particular para el presente proyecto adoptaremos la clasificación por el sistema de circulación (Figura 1-5).

POR EL SISTEMA DE CIRCULACIÓN:

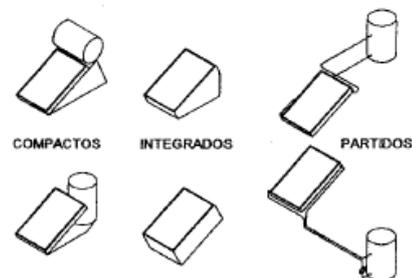
- Instalaciones por termosifón.
- Instalaciones por circulación forzada.

POR EL SISTEMA DE INTERCAMBIO:

- Instalaciones de transferencia indirecta: intercambiador exterior o interacumulador
- Instalaciones de transferencia directa.

POR LA FORMA DE ACOPLAMIENTO:

- Sistema compacto.
- Sistema partido.
- Sistema integrado.



POR EL SISTEMA DE ENERGÍA AUXILIAR:

- Instantáneo: individual, distribuido, centralizado
- En acumulador secundario: individual, distribuido, centralizado
- En acumulador solar (?)

Figura 1-5 Clasificación de los sistemas de energía solar para ACS (3)

Al clasificar por sistema de circulación se entiende que se está clasificando al sistema por cual es el “motor” que mueve al fluido. En las instalaciones de termosifón no hay presencia de bomba por lo que

el fluido funciona por un principio de diferentes densidades siendo esta una propiedad que depende de la temperatura del mismo fluido, concepto que ampliaremos posteriormente. En cuanto a sistemas por circulación forzada ya hay presencia de una bomba que genera el movimiento del fluido, con respectivas ventajas y desventajas frente al sistema de termosifón.

Los sistemas por termosifón se detallan en la figura 1-6, Partiendo desde el captador podemos ver que:

- a) El agua se calienta y procede a subir hasta el tanque de acumulación dado que el agua a medida que aumenta su temperatura disminuye su densidad, lo que le permite ascender.
- b) En el tanque de acumulación tendremos agua caliente ya que la salida del captador entra en la parte superior del tanque. La salida del agua caliente también estará ubicada en la parte superior del tanque. Al estar colocada la entrada de agua fría en el tanque en la parte inferior tendremos que en esa zona el agua dentro del tanque es más fría por lo que tendrá mayor densidad. De esta forma habrá una salida de agua fría (con mayor densidad) en dirección hacia la entrada del captador.
- c) El circuito vuelve a comenzar al empezar a calentar el agua fría a agua caliente en el captador termosolar.
- d) El circuito vuelve a comenzar al empezar a calentar el agua fría a agua caliente en el captador termosolar.

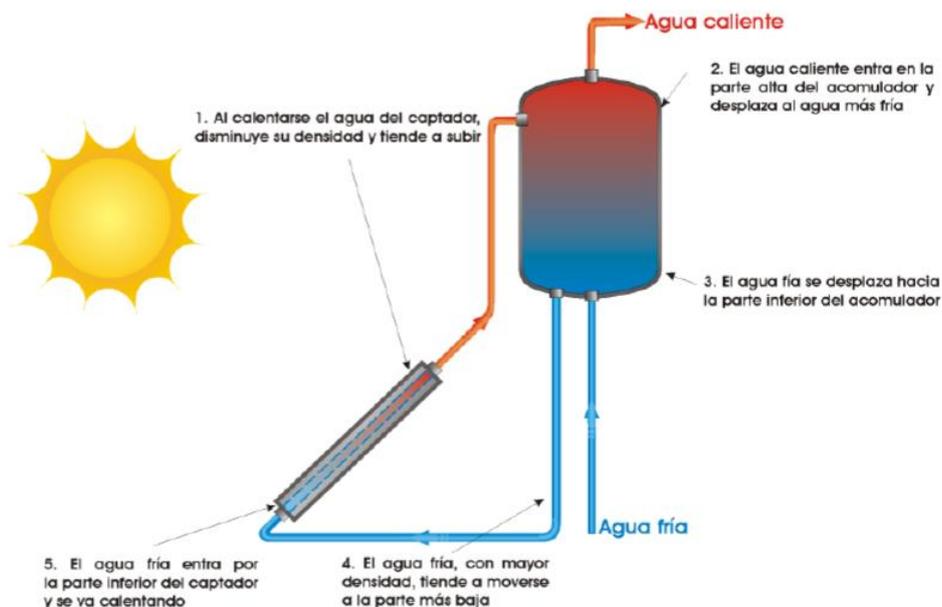


Figura 1-6 Esquema de un sistema de energía solar para ACS por termosifón (3)

En la figura 1-7 se resumen las ventajas y desventajas de los sistemas de termosifón:

VENTAJAS:

- Sencillez y fiabilidad.
- Autorregulación.
- Menor coste que los sistemas por circulación forzada.
- No necesita bomba de circulación. No consume energía eléctrica para mover el fluido.

INCONVENIENTES:

- Necesita un diseño y montaje muy cuidadoso que minimice las pérdidas de carga.
- No permite controlar la temperatura máxima en captadores.
- Posibilidad de flujo invertido.
- Escasa estética del sistema y difícil integración arquitectónica.

APLICACIONES:

En instalaciones individuales. Suelen ser compactos



Figura 1-7 Ventajas, desventajas y aplicaciones del sistema de termosifón (3)

Detallando ahora los sistemas de circulación forzada tenemos un ejemplo como el que se ilustra en la figura 1-8. En estos sistemas se dispone la ventaja de abarcar edificios en bloque con múltiples viviendas, además de otras ventajas. Cabe resaltar que este sistema debe estar acompañado además de una bomba, de un sistema de control que permita identificar cuando es conveniente el encendido o apagado de la bomba, ya que sin este la bomba debería funcionar constantemente por lo que hace ineficiente el ahorro energético.

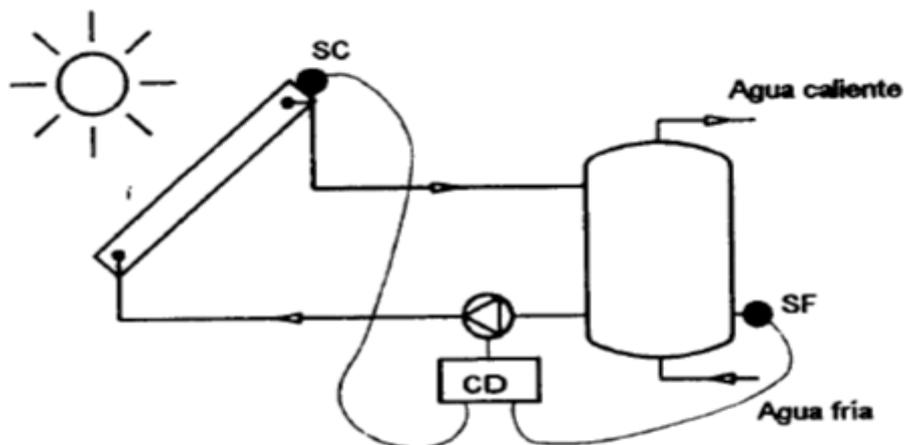


Figura 1-8 Ejemplo de un sistema simple de circulación forzada (3)

Los sistemas por circulación forzada es que pueden tener más de una bomba dado que puede constar el sistema de varios circuitos como veremos en la etapa de modelado y simulación.

A continuación, se resumen las ventajas e inconvenientes del sistema de circulación forzada en la figura 1-9. Una de las grandes ventajas de este sistema es que una bomba puede hacer circular el fluido que calientan gran número de captadores termosolares.

VENTAJAS:

- Control preciso del sistema.
- Permite controlar la temperatura máxima en captadores.
- No se produce flujo invertido.
- Mejor estética del sistema e integración arquitectónica.

INCONVENIENTES:

- Mayor coste que los sistemas por termosifón.
- Necesita bomba de circulación y por tanto consume energía eléctrica para mover el fluido.

APLICACIONES:

En instalaciones colectivas o individuales.

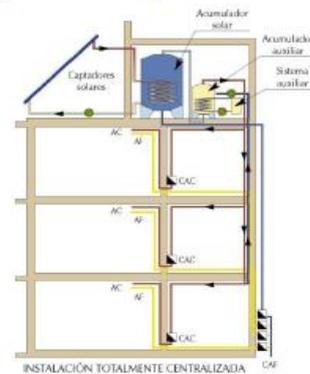


Figura 1-9 Ventajas, desventajas y aplicaciones de sistemas de circulación forzada (3)

Una aclaración muy pertinente en este punto luego de haberse evaluado ambos sistemas de circulación, es que en ambos sistemas se admite incorporar un intercambiador de calor. El efecto que esto tiene en el sistema de circulación forzada es que hace necesaria la incorporación de una bomba más a causa de ya tener un circuito de circulación de fluido más, esto claro en caso de que el intercambiador sea independiente.

En cuanto al sistema auxiliar hay distintos tipos de configuraciones posibles. En este apartado evaluaremos 4 y una quinta posibilidad de configuración se evaluará en el apartado 3, donde se establece la configuración en TRNSYS. Para ir comprendiendo de qué se trata véase la figura 1-10.

Como vemos en la figura 1-10 se tiene una configuración de carácter instantáneo por que se dispone de un calentador de energía eléctrica o a gas que permite, entregando calor, hacer el salto térmico necesario del fluido para llegar a la temperatura de consigna que este establecida.

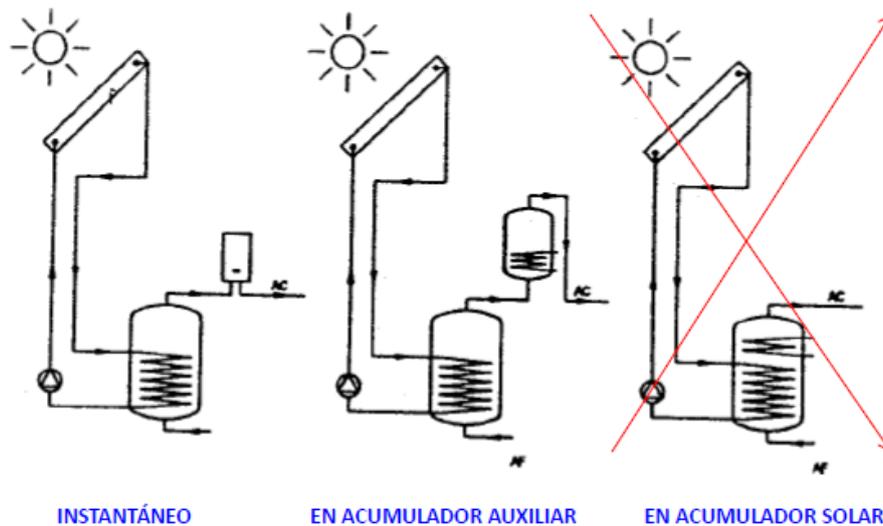


Figura 1-10 Configuraciones de instalación de energía solar para ACS con auxiliar (3)

La siguiente configuración en acumulador auxiliar, incluye un acumulador adicional con su propio sistema de calefacción a la salida del primer acumulador. Esto hace que se tenga una inercia mayor en el sistema y sea esta configuración mejor que la anterior.

La tercera configuración que dispone un sistema de cauxiliar dentro del acumulador solar, no está permitida por norma, como se ve en la figura 1-11.

- 3 En el caso de viviendas esta visualización y contraste de la energía producida por la instalación con respecto a la producción de proyecto podrá ser verificada de forma centralizada por quien la comunidad delegue o de manera individualizada por cada usuario particular mediante la incorporación de paneles de visualización, visores de lectura de contadores, etc. accesibles.
- 4 En el caso de instalaciones solares con acumulación solar distribuida será suficiente la contabilización de la energía solar de forma centralizada en el circuito de distribución hacia los acumuladores individuales.

2.2.5 Sistemas de acumulación solar y conexión de sistema de generación auxiliar

- 1 El sistema de acumulación solar se debe dimensionar en función de la energía que aporta a lo largo del día, y no solo en función de la potencia del generador (captadores solares), por tanto se debe prever una acumulación acorde con la demanda al no ser esta simultánea con la generación.
- 2 Para la aplicación de ACS, el área total de los captadores tendrá un valor tal que se cumpla la condición:

$$50 < V/A < 180$$

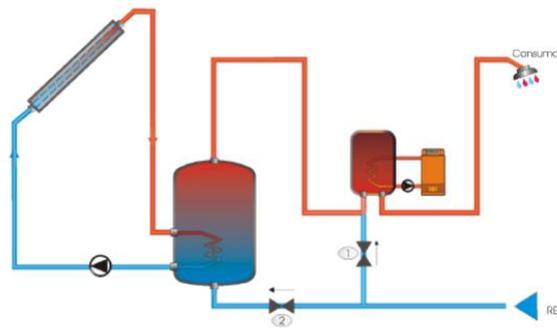
donde,

A suma de las áreas de los captadores [m²];
V volumen de la acumulación solar (litros).

- 3 No se permite la conexión de un sistema de generación auxiliar en el acumulador solar. Para los equipos de instalaciones solares que vengan preparados de fábrica para albergar un sistema auxiliar eléctrico, se deberá anular esta posibilidad de forma permanente, mediante sellado irreversible u otro medio.

Figura 1-11 Norma que prohíbe colocar el auxiliar dentro del acumulador solar (3)

La cuarta posible configuración (Figura 1-12), indica la opción de conectar la acometida de agua fría directamente a la entrada del auxiliar, con una llave de corte manual que se encuentra cerrada. Este by-pass permite suministrar agua caliente en periodos de mantenimiento de la instalación solar.



Conexión Acumulación – sistema auxiliar – entrada agua de red

Figura 1-12 Configuración con auxiliar y caudal compensatorio para ACS (3)

Existen otras variantes con mayor cantidad de puntos de consumo lo que implica establecer sistemas de energía solar térmica y acumuladores centralizados, y también auxiliares centralizados. Estas variantes se analizan en la figura 1-13.

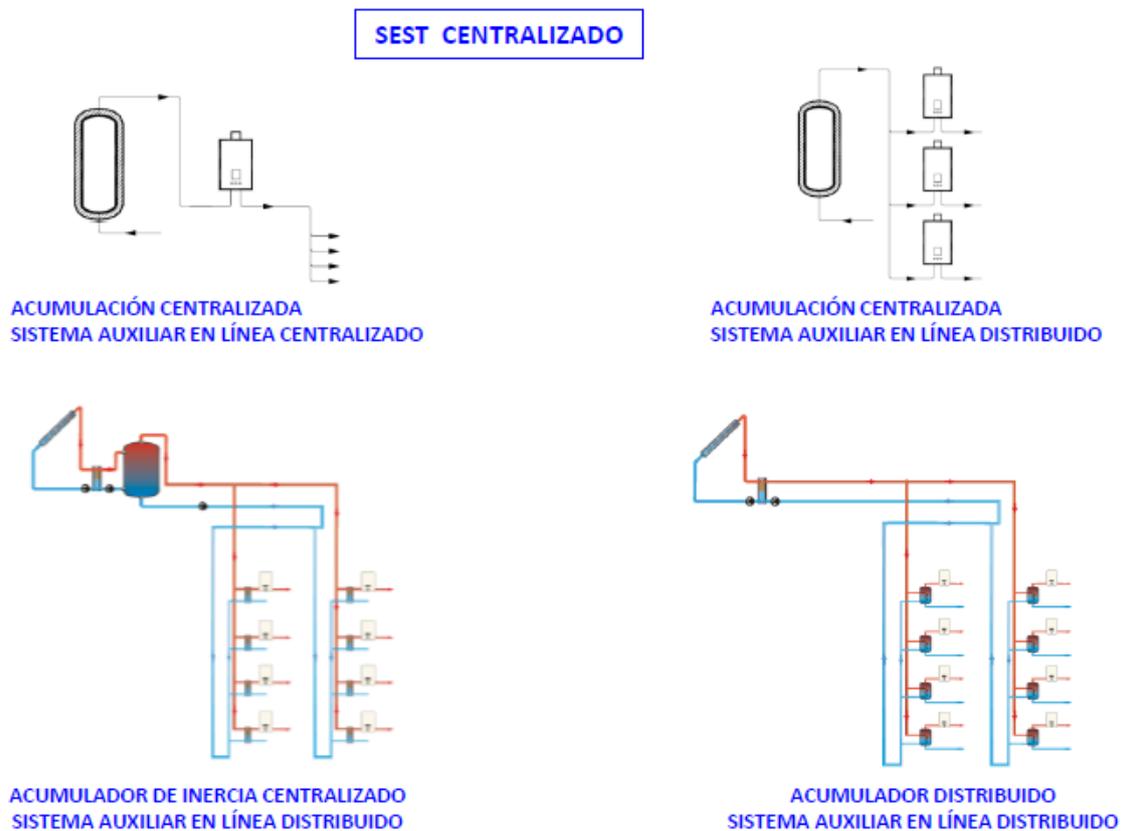


Figura 1-13 Configuraciones con múltiples puntos de consumo (3)

1.7 Descripción de un captador solar plano

Inicialmente un captador solar se puede definir como un tipo de intercambiador de calor especial que transforma la radiación solar en calor que luego transmitirá a un fluido caloportador. El flujo de radiación solar puede ser como máximo 1100 W/m^2 (sin concentración óptica) y es muy variable.

El sistema de captación de radiación solar está formado por un grupo de captadores solares conectados entre sí. Su misión es captar la energía solar para transformarla en energía térmica, aumentando la temperatura de fluido que circula por la instalación.

El tipo de captador térmico más extendido es el **captador solar plano** que consigue aumentos de temperatura de 60°C a un coste reducido. Estos captadores están indicados para la producción de agua caliente para diversas aplicaciones: agua caliente sanitaria, calefacción por suelo radiante, etc.

Los captadores solares planos son los sistemas más sencillos. Son elementos sin concentración, fijos y captan tanto radiación directa como difusa.

El captador solar plano está formado por una placa metálica que se calienta mediante la radiación solar con su exposición al Sol (absorbedor). Esta placa es de superficie selectiva de forma que no refleja la radiación solar incidente. Normalmente la placa solar está colocada en una caja con cubierta de vidrio. Por el interior de la caja se hace circular agua a través de un serpentín o un circuito de tubos de forma que el calor se trasmite al fluido a través de un proceso termodinámico.

El efecto que se produce es similar al de un invernadero, la luz del Sol atraviesa la placa de vidrio y calienta la placa ennegrecida. El vidrio es una **“trampa solar”**, pues deja pasar la radiación del Sol (onda corta) pero no deja salir la radiación térmica que emite la placa ennegrecida (onda larga) y como consecuencia, esta placa se calienta y trasmite el calor al líquido que circula por los tubos.

Existen también en el mercado los captadores solares de vacío. Consisten en tubos de metal que recubren el tubo metálico que contiene el fluido de trabajo dejando entre ambos una cámara que actúa como aislante. Tienen un rendimiento muy elevado, pero en este caso el costo es elevado.

Los captadores solares planos se componen de los siguientes **elementos (Figura 1-14)**:

- *Cubierta:* La cubierta debe ser de un material transparente, generalmente se trata de vidrio, pero existen determinados plásticos que también se pueden utilizar con la ventaja de ser más baratos y manejables. La función de la cubierta es **reducir al mínimo las pérdidas termodinámicas de calor** por la transmisión por convección y radiación y por eso debe tener una transmitancia solar lo más alta posible.
- *Canal de aire:* El canal de aire es un espacio que separa la cubierta de la placa absorbente y puede estar vacío o no. Para calcular su espesor se deben equilibrar las pérdidas por convección y las altas temperaturas que se pueden producir si es demasiado estrecho.
- *Placa absorbente:* La placa absorbente es el elemento que absorbe la energía solar y la transmite el calor al líquido que circula por las tuberías. La principal característica de la placa absorbente es que tiene que tener una gran absorción de la radiación solar y una emisión térmica reducida. Para cumplir este requisito se utilizan materiales combinados para obtener la mejor relación absorción / emisión.
- *Tubos o conductos:* Los tubos están tocando (a veces soldados) la placa absorbente para maximizar el intercambio de energía calorífica por conducción térmica. Por los tubos circula el líquido que se calentará y transportará el calor hacia el tanque de acumulación.
- *Capa aislante:* La finalidad de la capa aislante es recubrir el sistema para evitar y evitar pérdidas térmicas. Para que el aislamiento sea el mejor posible, el material aislante deberá tener una baja conductividad térmica. (Solar-energía, 2019)

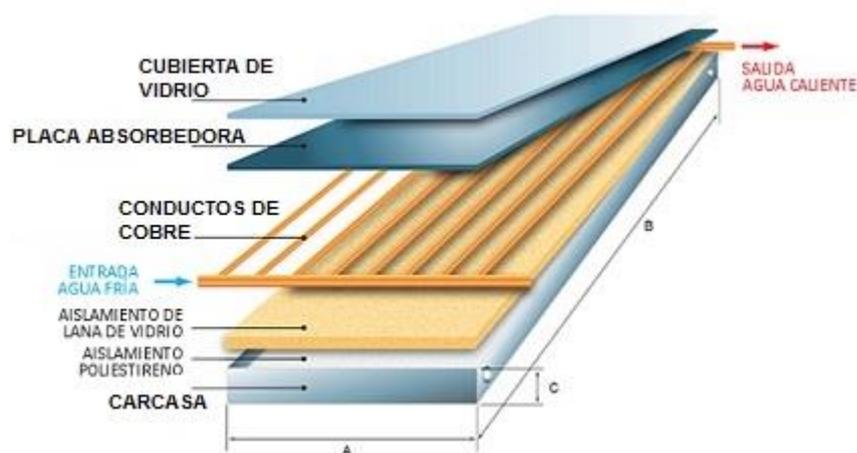


Figura 1-14 Elementos de un captador solar plano (2)

1.8 Antecedentes y objeto

Dado las grandes posibilidades energéticas de energías alternativas actuales y de forma más acentuada en la región sur de España. Un proyecto que utilice la energía solar es muy provechoso debido a los niveles de radiación solar presente.

En el presente proyecto se realizará el diseño y cálculo de un sistema de agua caliente sanitaria (A.C.S.) para un hotel ubicado en la localidad de los barrios. Se dispondrá entonces de la energía solar como medio principal de fuente de energía, esto genera que se reduzca la demanda de energía para la generación de ACS al suministro de red eléctrica o al suministro de gas.

Resulta entonces importante establecer cuáles son las bondades a grandes rasgos como medio de energía:

- Es un medio de energía renovable.
- El impacto medioambiental es mínimo y contribuye a la sustitución de energías no renovables.
- Puede ser un medio de energía aprovechable en caso de ausencia de redes de distribución de energía.
- A largo plazo genera un beneficio económico su implementación.

Para el dimensionamiento del presente proyecto se utilizará el programa de simulación TRNSYS que nos permitirá obtener parámetros en base horaria, de interés para el cálculo y diseño del sistema de ACS.

2 TRNSYS y el análisis de ficheros

2.1 Introducción

En el presente capítulo se busca identificar como es TRNSYS como software; como también cuál es su uso, cuál es su alcance, y como son los ficheros que se utilizaran en presente proyecto, junto con cuál es la relación que guardan las entradas, los parámetros y las salidas. Se dará entonces características de cada fichero y la interrelación que tendrán entre los ficheros.

2.2 Descripción de TRNSYS



Figura 2-1 Logo del software TRNSYS (9)

La herramienta TRNSYS (TRAnNsient SYstem Simulator) se desarrolló en el Solar Energy Laboratory de la Universidad de Wisconsin (EEUU). Es un Programa de simulación de sistemas termoenergéticos en régimen transitorio. TRNSYS adopta una estructura modular que fue diseñada para la resolución de sistemas complejos, donde cada uno de los componentes se describe mediante subrutinas más simples, denominadas según su nomenclatura como TYPE. Esta técnica modular permite analizar un sistema entero como la suma de componentes o sistemas individuales y la interconexión entre éstos.

Desde un punto de vista práctico, es abordar la resolución de pequeños problemas en vez de un gran problema. Cada TYPE o subrutina contiene uno o varios modelos de un componente del sistema. Especificando los parámetros y las variables de entrada, el modelo calcula las variables de salida dependientes del tiempo. Estos valores de salida calculados pueden ser usados como variables de entrada para otros modelos.

La forma de generar un proyecto en TRNSYS resulta muy intuitiva: se conectan gráficamente los componentes del sistema (TYPEs) en la interfaz visual Simulation Studio. Cada uno de los TYPEs se describe con un modelo matemático mediante lenguaje de programación Fortran y lleva asociado una Proforma en el Simulation Studio. Éste describe el componente como una caja negra por medio de entradas, salidas y parámetros.

Además de los TYPEs estándar que se encuentran en la librería de TRNSYS, pueden crearse componentes nuevos y mejorados, de una forma sencilla. Esto resulta de gran interés en este proyecto dadas las limitaciones que presentan los componentes estándar del software. Además, una vez modelado el sistema, se pueden hacer análisis de sensibilidad de cada una de las variables que intervienen en el modelo, de una forma cómoda y relativamente sencilla.

Otra de las ventajas del programa es la posterior preparación de una hoja TRNSED, mediante la cual estos sistemas pueden ser utilizados y simulados por usuarios ajenos al programa TRNSYS. (Pino & Guerra Macho, 2020)

TRNSYS se compone de 2 partes. La primera es un motor (llamado Kernel) el cual lee y procesa los datos de entrada, e iterativamente va resolviendo el sistema, determinando convergencias y graficando variables del sistema. La segunda parte está compuesta por extensas librerías de componentes (por ejemplo: bombas, turbinas, procesadores de clima, etc.), las cuales sirven para modelar el sistema. (Resources, 2019)

La naturaleza modular de TRNSYS permite incorporar nuevos modelos matemáticos al programa. Ya que los modelos de los componentes están escritos en Fortran, el usuario puede fácilmente modificarlos y generar nuevos componentes para tecnologías no incluidas en la librería standard. Distintos usuarios pueden compartir estos modelos sin necesidad de recompilar el programa gracias a la tecnología DLL. Sobre el archivo de entrada se pueden implementar estrategias sencillas de control de componentes u operaciones de pre o post procesamiento.

Para las entradas relativas a simulación de edificios, o en definitiva cualquier espacio acondicionado (nuestro autobús), se utiliza una interfaz específica (TRNBuild). El motor de simulación resuelve el sistema de ecuaciones algebraicas y diferenciales que representan el problema térmico. En la simulación, los componentes de los sistemas HVAC, la envolvente o epidermis del autobús y la red nodal para el aire se resuelven simultáneamente para cada paso de tiempo.

TRNBuild es una herramienta de TRNSYS que se utiliza para generar elementos con múltiples espacios que deben mantener unas condiciones ambientales determinadas ante unas condiciones externas. Los elementos generados con TRNBuild se utilizan en TRNSYS a través del Type 56

“multizone building” (edificios con múltiples espacios) para simular el comportamiento térmico de edificios, naves industriales y otros elementos.

Una vez especificada en TRNBuild la geometría y disposición espacial del edificio de los elementos constructivos y de los materiales con sus propiedades termofísicas, ocupación y cargas del edificio, se puede calcular el comportamiento térmico del edificio en TRNSYS expuesto a unas condiciones ambientales determinadas (temperatura ambiente, humedad relativa, radiación incidente sobre cada una de las caras del edificio, etc.).

El modelo proporciona como resultado la demanda instantánea de calefacción y refrigeración a lo largo del período de simulación considerado (por ejemplo 1 año). (Pino & Guerra Macho, 2020)

2.3 Aproximación en el modelado de componentes

Cada TYPE o subrutina contiene uno o varios modelos de un componente de sistema. Por ejemplo, la subrutina TYPE 4, es un modelo de tanque de almacenamiento. Especificando los parámetros (valores independientes del tiempo como por ejemplo el volumen del tanque) y las variables de entrada (valores dependientes del tiempo como la temperatura del agua de entrada y el flujo másico), el modelo calcula las variables de salida dependientes del tiempo (como por ejemplo, la temperatura del agua a la salida del tanque o la pérdidas de calor a través de la pared del tanque). Estos valores de salida calculados pueden ser usados como variables de entrada para otros modelos.

La aproximación al modelado es del tipo “tradicional”, ya que cada subrutina de TRNSYS modela y resuelve un sub-problema concreto, implementando en cada caso un método de resolución específico y a medida del problema. Dependiendo de la complejidad del sub-problema que representa el modelo, el código de los TYPEs de TRNSYS puede llegar a ser tan extenso y complejo que bien pudiera ser un programa de simulación en sí mismo.

Un caso muy representativo es el componente TYPE 56, que modela un edificio multizona, con un grado de detalle que supera a muchos programas específicos para el cálculo de la demanda energética en edificios. (Pino & Guerra Macho, 2020)

2.4 Creación de sistemas complejos

El usuario debe crear para simular un sistema un fichero de entrada para el ejecutable de TRNSYS que consiste en una descripción de los componentes que constituyen el sistema y sus interconexiones. Las subrutinas o TYPEs de TRNSYS se pueden ver como cajas negras que necesitan dos tipos de información para funcionar: los parámetros del componente en sí y las

variables de entrada. Algunas de las variables de entrada de un componente pueden ser variables de salida de otro componente del sistema, formando un “diagrama de flujo de información” que representa las interacciones (flujo de fluidos, de radiación, de señales de control, etc.) que aparecen en el sistema físico. Por tanto, también se deben definir las conexiones entre variables de salida de un componente y variables de entrada de otro componente. (Pino & Guerra Macho, 2020)

2.5 Escalas de tiempo contempladas

Las simulaciones pueden realizarse con un paso de tiempo especificado por el usuario: desde varias horas hasta varios segundos, dependiendo del tipo de proceso que requiera ser estudiado. El paso de tiempo elegido es único para todos los componentes, no es posible definir diversos pasos de tiempo en una misma simulación. Sin embargo, en algunos componentes se adopta la solución de definir un paso de tiempo interno adaptado a las necesidades del sub-problema representado. (Pino & Guerra Macho, 2020)

2.6 Paso de tiempo

Para calcular las prestaciones de una instalación a lo largo de un año, se divide el año en periodos de tiempos iguales y se resuelve el estado del sistema (temperaturas, flujos, señales de control, etc.) en cada intervalo. El paso de tiempo es la duración de estos intervalos y define la resolución temporal de la simulación.

Por ejemplo, si el paso de tiempo es de una hora, el año se divide en 8760 intervalos (= 365 días x 24 horas/día) y el modelo se resuelve 8760 veces, una vez en cada intervalo. La simulación habrá generado series temporales de 8760 valores para cada variable: temperatura de refrigeración, temperatura del circuito de agua fría, caudal del circuito de agua fría, etc.

Estos resultados, muy cuantiosos, se procesan e integran para calcular las métricas mensuales y anuales que se recogen en el informe: demanda, consumos, eficiencias, etc.

Como en cualquier otro sistema físico, en un sistema de climatización podemos encontrar fenómenos rápidos, por ejemplo, el movimiento del fluido en las tuberías o las actuaciones del sistema de control. Afortunadamente, las prestaciones anuales de la instalación no dependen demasiado de estos detalles, estando dominadas por fenómenos más lentos. Fácilmente pueden identificarse procesos que se repiten cada 24 horas:

- La demanda suele seguir el ciclo día/noche.
- La temperatura exterior también suele seguir un ciclo diario.

Aunque la periodicidad sea de un día, sabemos que las condiciones meteorológicas en dos días consecutivos son diferentes. Esto hace necesario ampliar el horizonte de tiempo. Teniendo en cuenta las estaciones, el periodo mínimo de simulación se sitúa en un año. Sin embargo, el clima también varía de año en año, de manera que el horizonte se extiende al periodo de vida de la instalación, supongamos un valor de 15 años.

Suponiendo que el clima de los siguientes 15 años será parecido al de los 15 anteriores, habría que simular la instalación utilizando un registro de condiciones meteorológicas de 15 años. De esta manera podremos estimar con bastante exactitud cuanta energía convencional ahorrará el sistema de climatización durante su vida útil.

Este procedimiento tiene dos inconvenientes evidentes:

- No suelen haber registros meteorológicos tan detallados.
- El tiempo de cálculo es demasiado grande.

La solución consiste en utilizar un año típico para la localidad. Este año no describe el clima en un año concreto, sino que se trata de un año artificialmente generado de manera que describa las características medias del clima del lugar. Llegaremos así a la escala horaria, que es la más utilizada en este tipo de cálculos para representar un buen compromiso entre precisión, tiempo de cálculo e información requerida. Este último factor se refiere a la cantidad de información necesaria para ejecutar una simulación. Por ejemplo, hoy en día es fácil conseguir medidas de datos meteorológicos (temperatura, radiación) para cada hora del año, pero es bastante más difícil para cada minuto.

Atendiendo a los anteriores comentarios, debería utilizarse una hora. En realidad todos los esquemas utilizan pasos de tiempo menores por ciertas cuestiones numéricas que no trataremos aquí. Se puede modificar el paso de tiempo siempre que se quiera. De hecho, una buena práctica consiste en simular la misma instalación con distintos pasos de tiempo, para comprobar que los resultados no difieren demasiado ($< 5\%$ por ejemplo). Si son muy distintos, se debe repetir la simulación utilizando un paso de tiempo inmediatamente inferior al último que se utilizó, y así hasta que los resultados sean consistentes. (Pino & Guerra Macho, 2020)

2.7 Librerías de modelos y creación de modelos

La librería estándar de TRNSYS incluye la mayoría de componentes comúnmente encontrados en los sistemas termoenergéticos (desde equipamientos HVAC hasta edificios en forma detallada, desde controladores y sistemas de regulación hasta colectores solares), así como subrutinas de componentes que permiten tratar datos meteorológicos y otras funciones de

carácter transitorio. TRNSYS también dispone de subrutinas que permiten el tratamiento y dar formato de salida a los resultados de las simulaciones. (Pino & Guerra Macho, 2020)

2.8 Modificación y creación de componentes

Ya que los modelos de los componentes están escritos en FORTRAN, el usuario puede modificarlos y generar nuevos componentes para tecnologías no incluidas en la librería standard. Debido a que son más de 300 los usuarios de TRNSYS en todo el mundo existen disponibles librerías no standard que simulan el comportamiento de otros componentes.

Existe una librería de componentes de libre acceso cuyos códigos fuentes los autores ponen al servicio de la comunidad científica. También existen librerías de componentes que comercializan los distribuidores de TRNSYS, desde bombas de calor y sistemas geotérmicos hasta modelos detallados de colectores solares, controladores o piscinas. (Pino & Guerra Macho, 2020)

2.9 Entorno del software

El paquete completo de TRNSYS incluye además de los códigos fuente de las subrutinas y el programa ejecutable, el entorno TRNSHELL que permite la edición de ficheros e incorpora en un solo programa las acciones necesarias para construir, ejecutar y analizar una simulación. TRNSYS permite al usuario describir completamente y visualizar todas las interacciones entre componentes del sistema. Mediante una interface basada en iconos gráficos, el usuario directamente define los componentes de su sistema y los conecta.

Mediante esta interface gráfica denominada Simulation Studio, tiene la capacidad de definir los parámetros y variables de entrada de cada uno de los componentes del sistema y de crear el fichero de entrada para que el ejecutable TRNSYS pueda realizar la simulación. (Pino & Guerra Macho, 2020)

2.10 Estructura interna del programa

La Figura 2-2 muestra la estructura interna del programa TRNSYS. Como ya se ha dicho, todo el programa está escrito en el lenguaje de programación FORTRAN. Se organiza en torno a una subrutina principal ("main", trnsys.for), que invoca convenientemente a las demás, aunque algunas subrutinas pueden hacer llamadas a otras sin pasar por la principal.

Las component subroutines contienen los modelos de componentes, mientras que el resto forma propiamente el núcleo del programa. Las cinco más importantes son:

- BLOCKDATA – Inicializaciones.
- PROC – lectura del fichero de datos (entradas).
- CLOCK – Reloj.
- EXEC - llama a las subrutinas de componentes, chequea la convergencia y actualiza el valor de las variables.
- PRINT – controla las salidas.

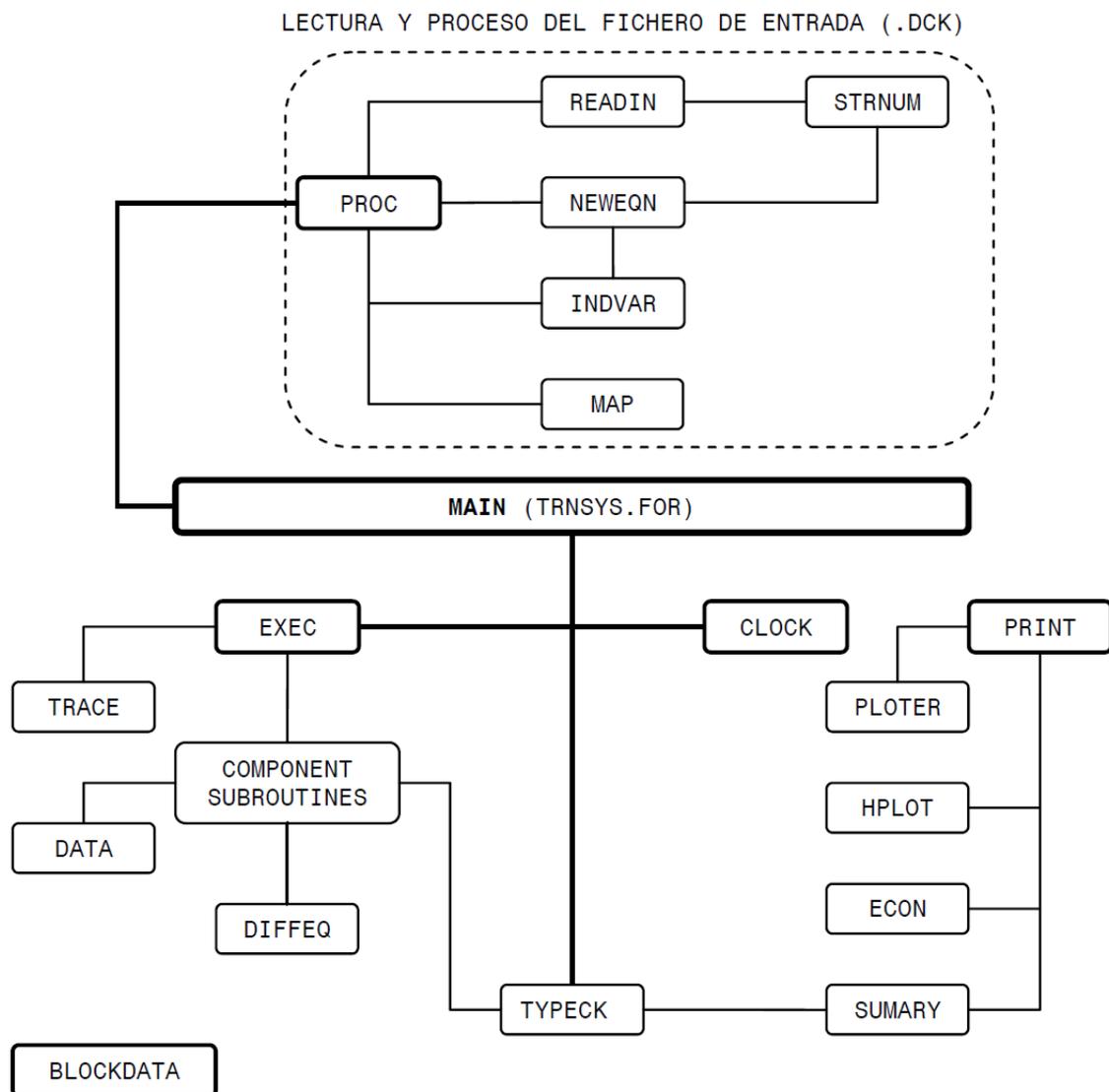


Figura 2-2 Subrutinas que constituyen TRNSYS, contenidas en TRNSYS.DLL (7)

Todas las subrutinas anteriores se compilan para formar una librería de enlace dinámico (TRNLIB.DLL). Una DLL (Dynamic Link Library) es un conjunto de subrutinas enlazadas y compiladas en una unidad independiente de las aplicaciones que la utilicen. Dispone de un interfaz definido a través del cual

interacciona con los programas que la invocan, a los que se asocia en tiempo de ejecución, no de compilación. Esto permite que dos programas utilicen el código contenido en la librería sin necesidad de duplicar el espacio en memoria.

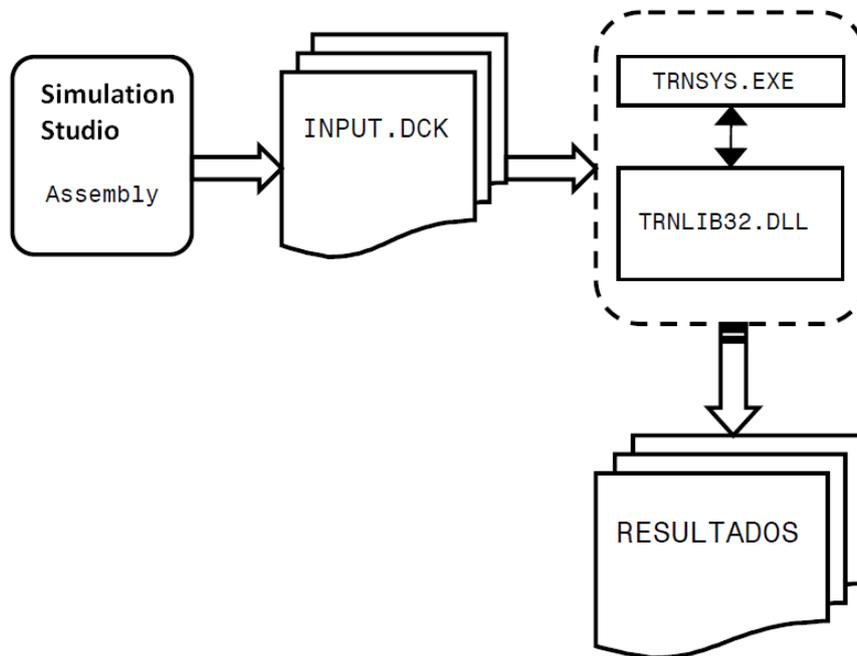


Figura 2-3 Estructura global de TRNSYS. (7)

En el caso de TRNSYS, el uso de una DLL tiene una ventaja adicional fundamental: el usuario tiene la posibilidad de añadir componentes escritos por él mismo. Para hacerlo, debe compilar de nuevo la TRNLIB.DLL habiendo añadido la nueva subrutina (el código fuente de las demás subrutinas está disponible para ello, así como para depurar errores). El programa ejecutable de TRNSYS se llama TRNSYS.EXE y se encarga de interactuar con el sistema operativo Windows. Todo lo dicho se recoge en la Figura 2-3. (Pino & Guerra Macho, 2020)

2.11 El motor de cálculo o “solver” de TRNSYS

Este apartado trata algunas cuestiones básicas acerca del modo en que TRNSYS opera internamente, ya que resultan fundamentales para la comprensión de algunas de las subrutinas escritas para este trabajo. El programa sigue una aproximación de tipo “tradicional”, aunque no está específicamente adaptado a la simulación de espacios acondicionados y sistemas HVAC, sino que tiene un propósito más general, incluyendo en principio cualquier tipo de sistema termoenergético.

Por tanto, el solucionador que combina las soluciones de los diferentes sub-problemas que constituyen los componentes o “TYPEs” de TRNSYS debe ser

también de propósito general. TRNSYS ofrece un método de sustitución sucesiva. El usuario debe elegir el paso de simulación (Δt , constante) y los instantes inicial (t_0) y final (t_f) de simulación. Con esta información se discretiza el dominio del tiempo según una malla de paso constante, Figura 2-4.

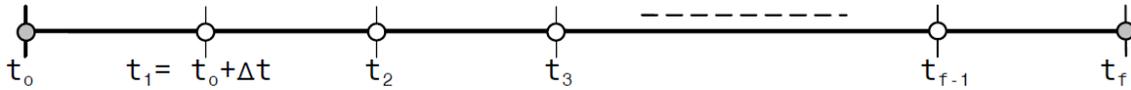


Figura 2-4 Discretización del periodo de simulación con paso de tiempo constante (7)

La evolución en tiempo tiene lugar a saltos entre nodos consecutivos de la malla. A partir de las condiciones de contorno de problema, conocidas en todo momento, el solucionador llama secuencialmente a cada componente₁ con los valores de entrada calculados en esa iteración y después comprueba la convergencia de las salidas dentro de la tolerancia especificada por el usuario. Si en una iteración se detecta que las salidas convergen, se da por buena su solución y se avanza en tiempo al siguiente paso, volviendo a repetirse el proceso. Si tras un número especificado de iteraciones no hubiera convergencia en los valores de salida, se salta directamente al siguiente paso. Si esta circunstancia se repite más de un cierto número definido de veces, la simulación se detiene con un mensaje de error.

Es importante tener en cuenta que los valores de entrada que se generan en las iteraciones son tentativos. (Pino & Guerra Macho, 2020)

2.12 Descripción de unidades utilizadas para la simulación

Básicamente TRNSYS (utilizaremos la versión número 16) nos permitirá simular la operación de los varios componentes del sistema de ACS y su correspondiente interrelación. Cabe destacar que es aconsejable para integrar al sistema cada fichero se debe previamente configurar el fichero en un nuevo archivo de TRNSYS aparte, para lograr mitigar errores al momento de ponerlo en funcionamiento con los demás ficheros del sistema, esto claramente dependerá de la experiencia previa del usuario del software.

A continuación, detallaremos brevemente cada uno de los componentes utilizados en el software y las relaciones que guardan las entradas, parámetros y salidas:



Type 9e: Este es un fichero meteorológico del tipo lector de datos que nos dará valores de los parámetros meteorológicos al cabo de 1 año. La importancia de este fichero reside en que es uno de los puntos de partida para el armado del sistema de simulación, dado que los parámetros que se

obtienen de este dependen de la ubicación geográfica donde se va a realizar el proceso de simulación.

Dentro de las variables de salida que se pueden obtener de este fichero se encuentran:

1. Hora del año
2. Día del mes
3. Mes
4. Hora del día
5. Radiación global sobre superficie horizontal
6. Temperatura de bulbo seco
7. Temperatura de bulbo húmedo
8. Velocidad del viento
9. Dirección del viento

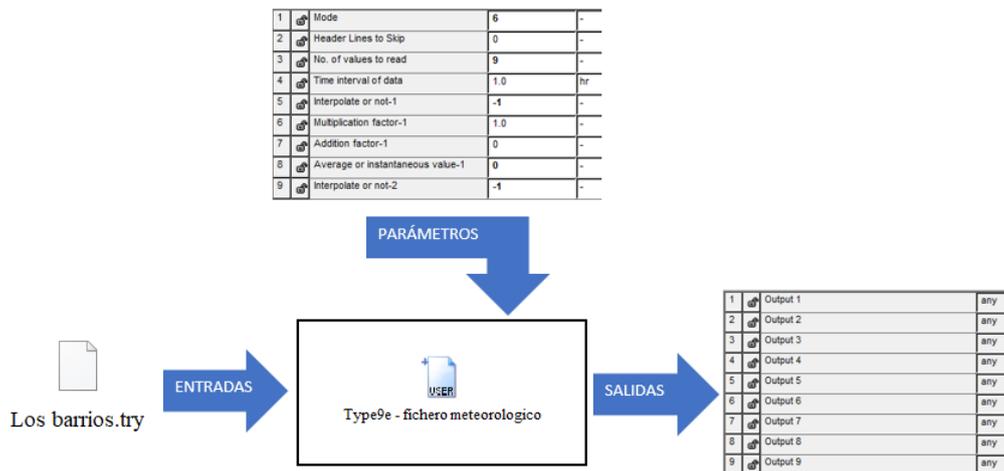
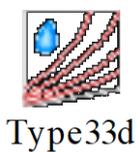


Figura 2-5 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 9



Type33d: Este es un fichero que funciona como procesador de parámetros de aire húmedo. Básicamente en este presente proyecto se busca obtener la humedad relativa del aire por medio de este procesador.

A continuación, se resume una descripción del mismo TRNSYS acerca de este fichero: “This component takes as input the dry bulb temperature and dew point temperature of moist air and calls the TRNSYS Psychrometrics routine, returning the following corresponding moist air properties: dry bulb temperature, dew point temperature, wet bulb temperature, relative humidity, absolute humidity ratio, and enthalpy”. (TRNSYS 16).

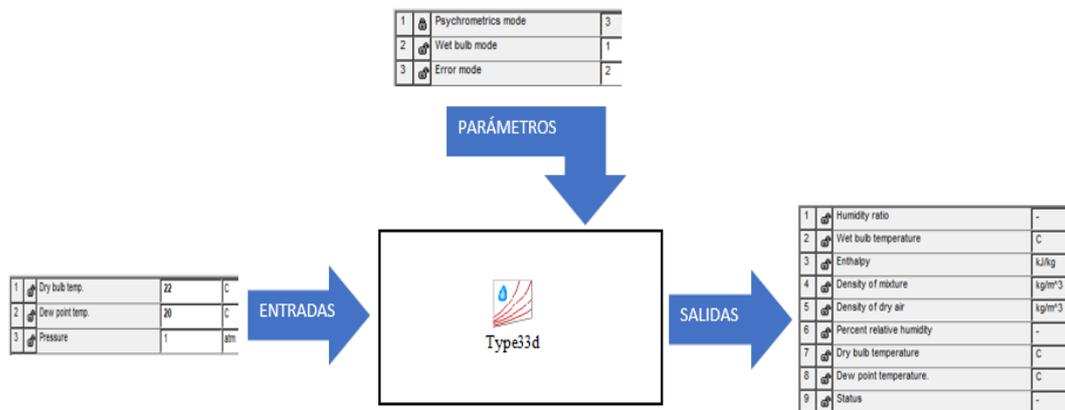


Figura 2-6 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 33d



TYPE16c -proc solar- temp y hum conoc

TYPE16c: Este fichero es un procesador de la radiación solar. Del mismo se obtienen parámetros muy importantes para la simulación y que son datos de entrada fundamentales para el sistema de captación solar.

Es en general obligatorio un tipo de fichero como esto que permita traducir los parámetros para ser entradas del fichero que representa al captador solar en todo proyecto de ACS (agua caliente sanitaria) simulada en TRNSYS.

Dentro de las variables de salida que se obtienen en este fichero se tiene (Figura 2-7):

Extraterrestrial on horizontal
Solar zenith angle
Solar azimuth angle
Total horizontal radiation
Beam radiation on horizontal
Horizontal diffuse radiation
Total radiation on surface 1
Beam radiation on surface 1
Sky diffuse on surface 1

Figura 2-7 Variables de salida del fichero TYPE16c

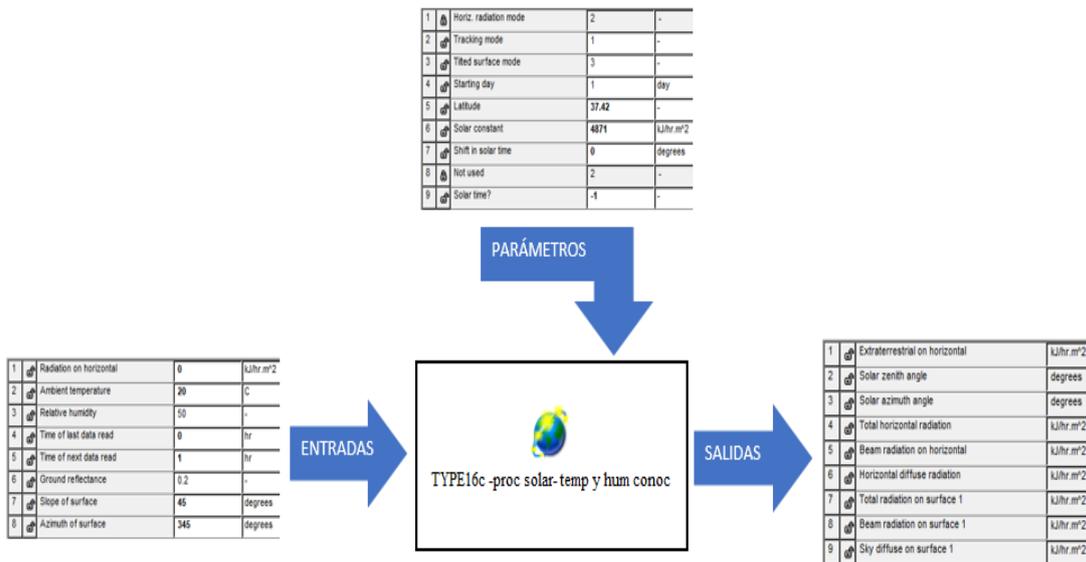


Figura 2-8 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 16c



Type1b - Captador solar plano

Type1b: Este fichero representa a un captador solar plano. Básicamente permite simular el accionar de la red de captadores planos de la instalación. Es imperativo identificar que este componente del sistema es sumamente importante ya que es el alma del circuito primario. Por esto identificaremos sus variables de entrada y de salida.

Dentro de los parámetros de entrada tendremos:

- Temperatura del fluido de entrada
- Caudal del fluido de entrada
- Temperatura ambiente
- Radiación incidente
- Radiación total horizontal
- Radiación difusa horizontal
- Reflectividad del terreno
- Angulo de incidencia
- Inclinación del captador

Mientras que sus variables de salida son:

- Temperatura del fluido de salida
- Caudal del fluido de salida
- La ganancia de energía útil

Simulación dinámica y evaluación de una instalación de energía solar térmica para producción de agua caliente sanitaria en un hotel

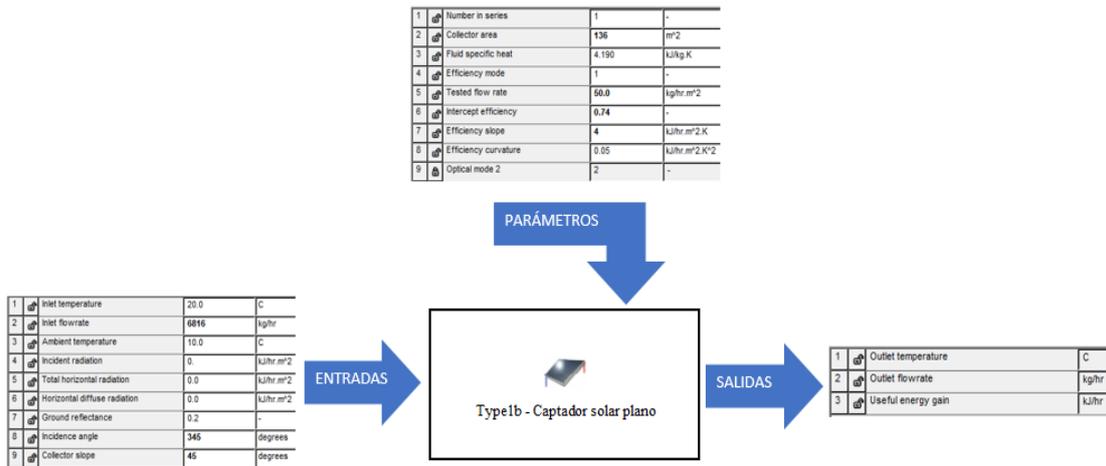


Figura 2-9 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 1b



TYPE31

TYPE31: Este fichero representa a una tubería en el sistema. Su función fundamentalmente es para apreciar las pérdidas de calor en el sistema por transporte del fluido. Su utilización es importante sobre todo cuando se dispone de grandes longitudes de tuberías.

Entre las variables de salida importantes que se pueden mencionar de este fichero se encuentra las pérdidas de calor con el medio ambiente.

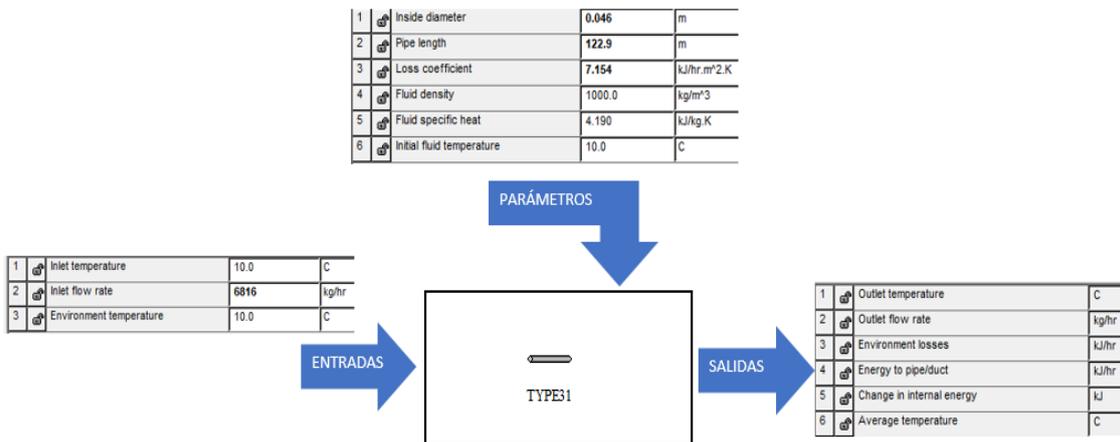


Figura 2-10 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 31



TYPE4a - tanque solar

TYPE4a: Este fichero esta presenta para representar un tanque y en este caso estamos hablando de un tanque estratificado con las entradas y salidas fijas. La función de este tanque el sistema de almacenamiento es la de proveer inercia al sistema

primario y permitir un espacio físico para la confluencia de entradas y salidas, estas son unas de las funciones entre otras funciones de un tanque de almacenamiento.

Además, cabe resaltar, que estos tanques de almacenamiento permiten simular si tuvieran resistencias en su interior, pero por normativa española no es posible utilizar estos auxiliares en el sistema primario.

Dentro de las variables de salida se encuentra (Figura 2-11):

Temperature to heat source
Flowrate to heat source
Temperature to load
Flowrate to load
Thermal losses
Energy rate to load
Internal energy change
Auxiliary heating rate
Element 1 power

Figura 2-11 Variables de salida del fichero TYPE4a

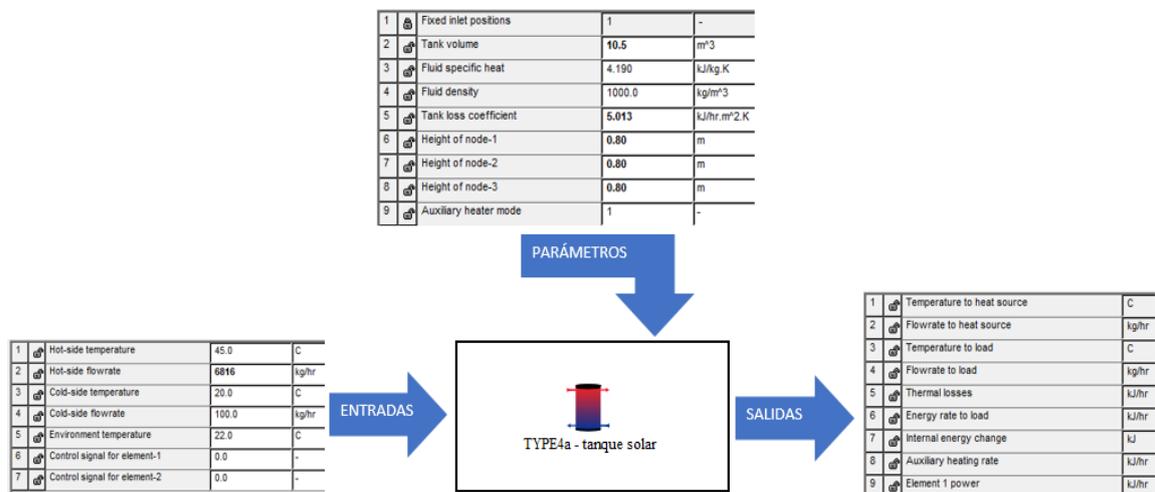


Figura 2-12 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 4a



Type114 - bomba circ. solar

Type114: Este fichero se ocupa de simular una bomba en el sistema. Es necesaria la presencia de una bomba en los circuitos para garantizar el movimiento de los fluidos caloportadores. Pero el funcionamiento de estas bombas no es continuo, debe estar adaptado a las condiciones del sistema y estarán comandadas por

otro fichero que establecerá los momentos de on y de off (prendido y apagado) de las bombas según los requerimientos en el tiempo. Es importante controlar bien los momentos de arranque y apagado de las bombas por que repercuten en el consumo de energía de toda la instalación.

Dentro de las variables de salida para este fichero se encuentra:

- Temperatura del fluido de salida
- Caudal del fluido de salida
- Consumo de potencia
- El calor transferido al fluido por la operación de la bomba
- Traslado de calor al medio ambiente

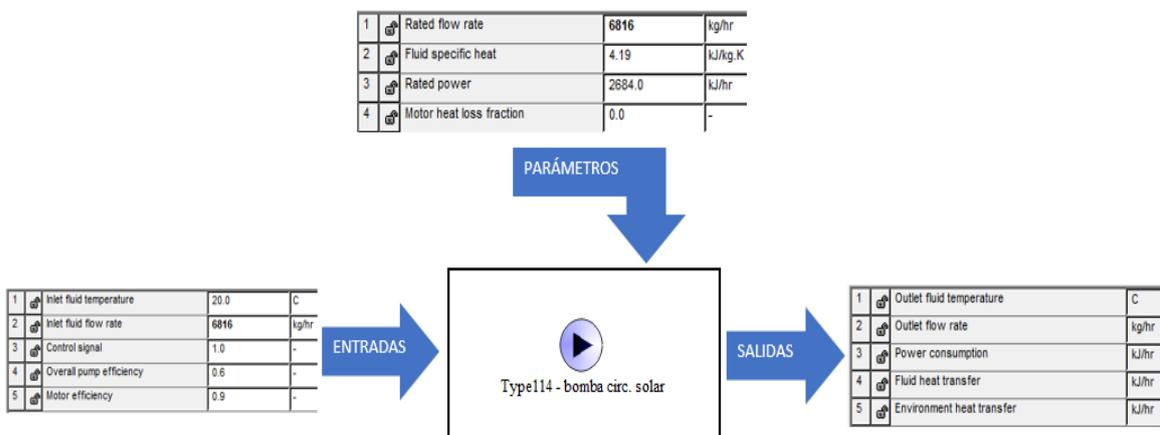


Figura 2-13 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 114



TYPE2b - control bba solar

TYPE2b: Este fichero simula un actuador que se encarga de controlar el encendido o apagado de las bombas. La configuración del mismo tiene en cuenta las temperaturas de las corrientes frías y las corrientes calientes del sistema, como también una temperatura de referencia a la cual se quiere erogar el fluido. Además, se dispone de un sistema que contempla las bandas muertas para los seteos de temperatura de arranque tanto para el límite inferior seteado como para el corte en el límite superior seteado.

Sin este seteo de bandas muertas se obligaría al sistema a condiciones indeseables: continuo funcionamiento de la bomba, arranques y cortes sucesivos en muy cortos intervalos de tiempo o funcionamiento de la bomba en momentos innecesarios.

Es de vital importancia la correcta configuración de este fichero ya que puede repercutir en usos inadecuados de las bombas lo que haría más ineficiente al sistema y se consumiría más potencia de la necesaria en el punto óptimo de

configuración. Cabe resaltar que la única variable de salida en este fichero es la de encendido o apagado.

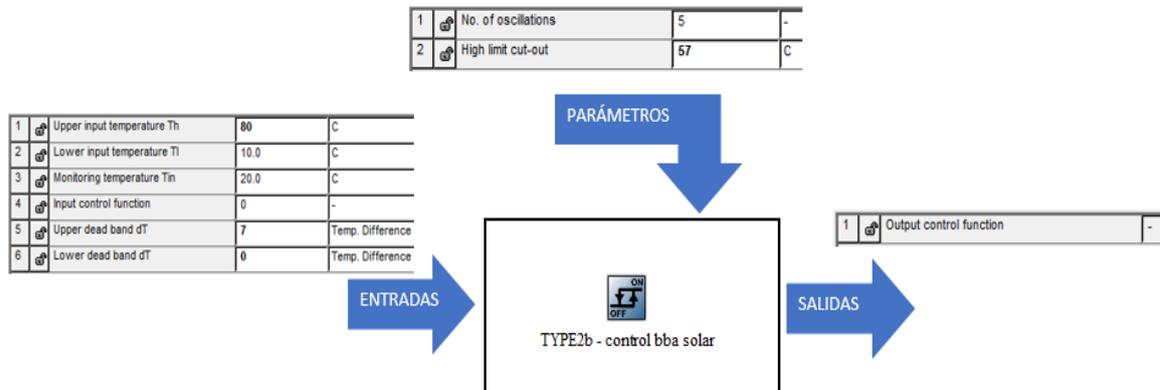


Figura 2-14 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 2b



TYPE14a - ocupacion del edificio

TYPE14a: El fichero se encarga de representar la ocupación en el tiempo de una edificación. Mediante este podemos entonces establecer la ocupación del hotel en el periodo de 1 año, lo que luego nos permitirá obtener la demanda total de agua caliente en cada momento del año. Para verificar que la configuración es correcta de este fichero se debe constatar con un fichero ploter para verificar como es la distribución de la ocupación a lo largo del año mediante un gráfico.

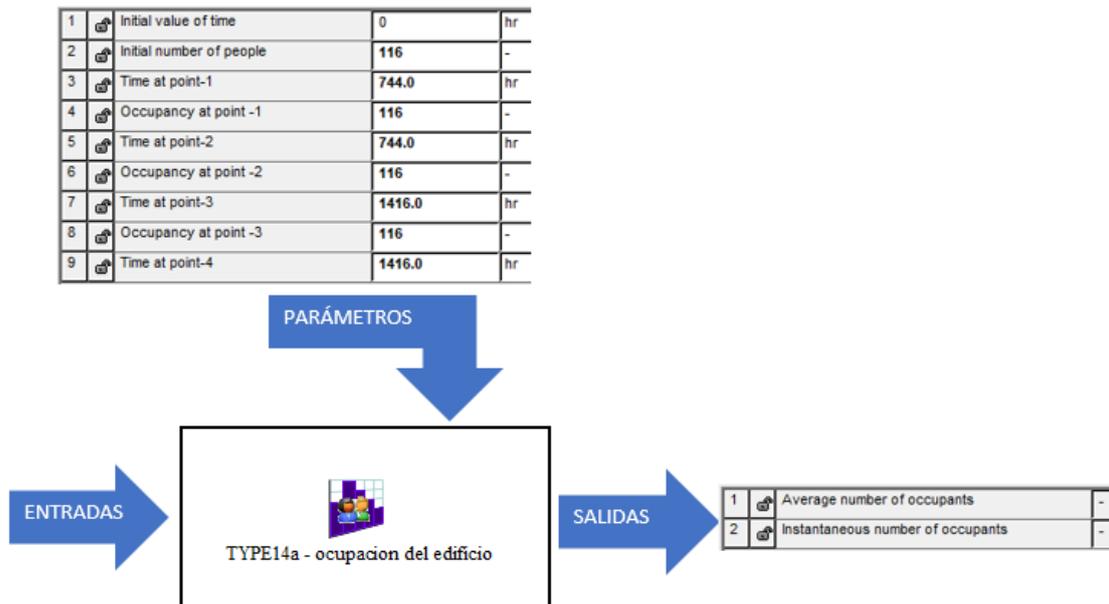


Figura 2-15 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 14a



TYPE14h - temp agua entrada

TYPE14h: Este fichero permite representar como varia una variable como puede ser el coeficiente de uso del agua o puede ser la temperatura del agua en un periodo de tiempo. Mediante este podemos entonces establecer los valores de

alguna variable en el periodo de 1 año, lo que luego nos permitirá obtener la demanda total de agua en cada momento del año. Para verificar que la configuración es correcta se debe constatar con un fichero plotter para verificar la distribución de la ocupación a lo largo del año mediante un gráfico.

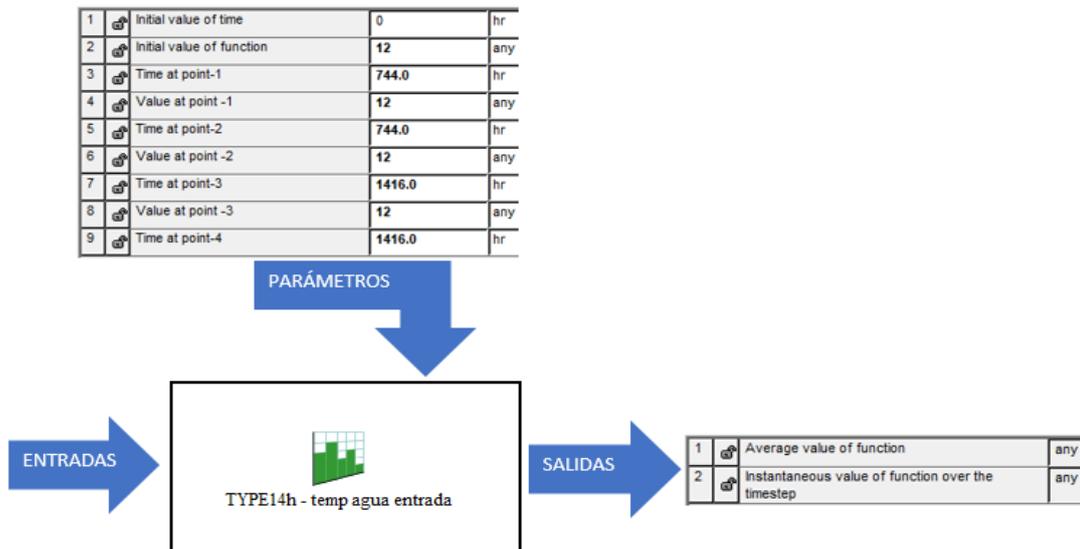


Figura 2-16 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 14h



TYPE11b - Tempering valve Tee divergente

TYPE11b: Permite simular una válvula divergente que regula la corriente de salida según la temperatura. Se logra así que la temperatura de salida del sistema de agua caliente sanitaria sea la de

consigna, 55°C en este caso. Si la temperatura de salida del sistema primario es menor de 55°C no habrá un caudal de agua fría compensatoria, pero en caso contrario se habilita la salida de agua fría para mantener la salida de 55°C en el sistema. Esta válvula debe colocarse previo a entrar al sistema primario.

Dentro de las variables de salida tendremos:

- Temperatura de la salida N°1
- Caudal de la salida N°1
- Temperatura de la salida N°2
- Caudal de la temperatura N°2
- Función de control

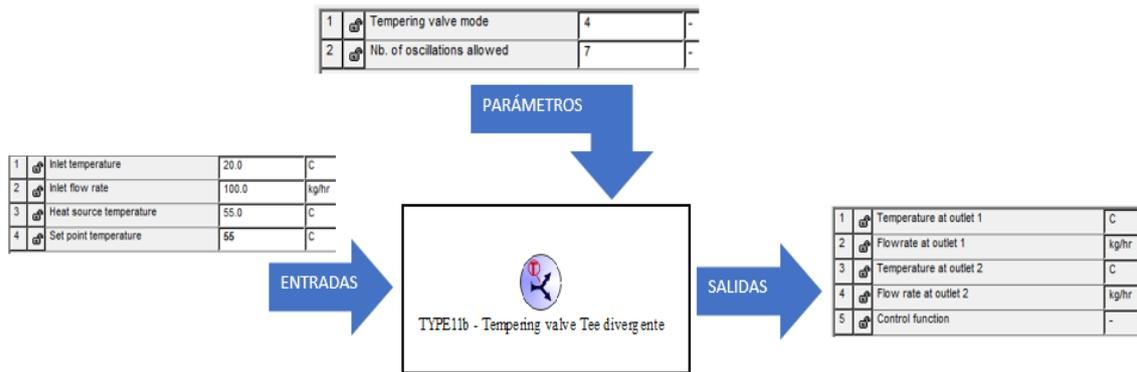


Figura 2-17 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 11b



TYPE11h - Tee convergente

TYPE11h: Mediante este fichero se simula una válvula convergente de 2 entradas a 1 salida. Tendrá para este caso una corriente caliente de entrada y una corriente caliente de entrada para que la mezcla de ambas de una corriente de salida a la temperatura de consigna, 55°C en este caso. Esto se logra por la configuración de la válvula divergente que regula la temperatura (TYPE11b). Esta válvula se coloca al final del sistema de ACS, y contiene una entrada que proviene del tanque que se vincula con el auxiliar y otra entrada que proviene de la corriente fría de la válvula divergente.

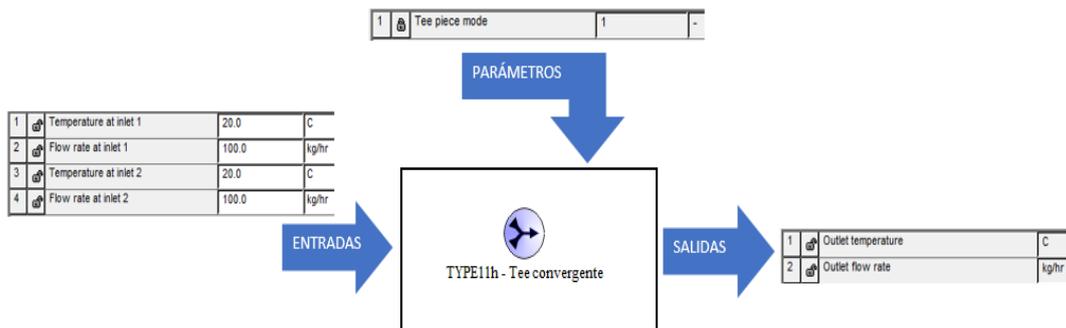


Figura 2-18 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 11h



TYPE6 - auxiliar

TYPE6: Simula un calentador auxiliar. Para este caso simula la función de calderas que son parte del sistema secundario, que aporta el calor necesario para alcanzar la temperatura de consigna. La caldera deberá estar bien configurada para no entrar en funcionamiento en momento que no haya demanda o cuando es suficiente con el calor suministrado en el sistema primario. Debe realizarse tomando valores adecuados para las siguientes variables (Figuras 2-19, 2-20, 2-21):

(version 19b) TYPE6 - auxiliar

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment	
1	☞	Maximum heating rate		720000		kJ/hr	More...
2	☞	Specific heat of fluid		4.19		kJ/kg.K	More...
3	☞	Overall loss coefficient for heater during operation		0.0		kJ/hr.K	More...
4	☞	Efficiency of auxiliary heater		0.79		-	More...

Figura 2-19 Parámetros del fichero TYPE6

(version 19b) TYPE6 - auxiliar

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment	
1	☞	Inlet fluid temperature		20.0		C	More...
2	☞	Fluid mass flow rate		9000		kg/hr	More...
3	☞	Control Function		1		-	More...
4	☞	Set point temperature		60		C	More...
5	☞	Temperature of surroundings		20.0		C	More...

Figura 2-20 Variables de entrada del fichero TYPE6

(version 19b) TYPE6 - auxiliar

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment	
1	☞	Outlet fluid temperature		C		More...	<input type="checkbox"/>
2	☞	Outlet fluid flow rate		kg/hr		More...	<input type="checkbox"/>
3	☞	Required heating rate		kJ/hr		More...	<input type="checkbox"/>
4	☞	Losses from the auxiliary heater		kJ/hr		More...	<input type="checkbox"/>
5	☞	Rate of energy delivery to fluid stream		kJ/hr		More...	<input type="checkbox"/>

Figura 2-21 Variables de salida del fichero TYPE6

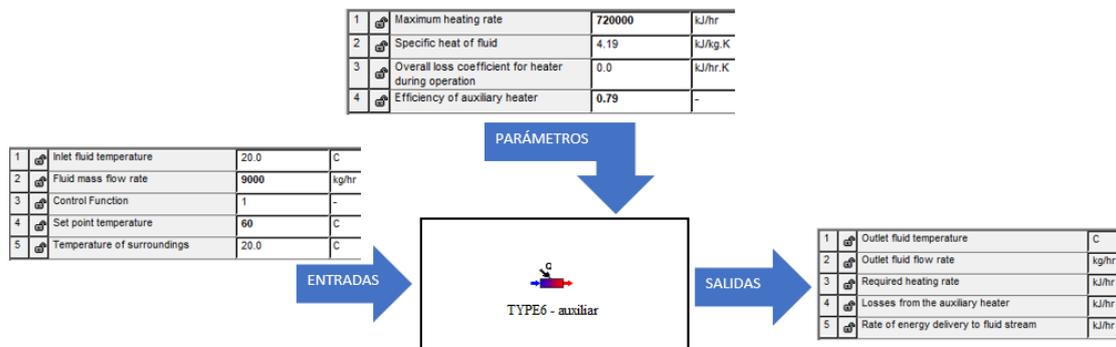


Figura 2-22 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 6



TYPE5b - intercambiador counterflow

TYPE5b: Simula es la función de un intercambiador en contracorriente. En este proyecto este intercambiador de calor es el nexo entre el auxiliar y el tanque del sistema secundario, ya que permite el intercambio de calor entre 2 corrientes de fluido. El fluido caliente proviene desde el auxiliar y la corriente fría (que en realidad llega precalentada por el sistema primario) proviene del tanque del sistema secundario.

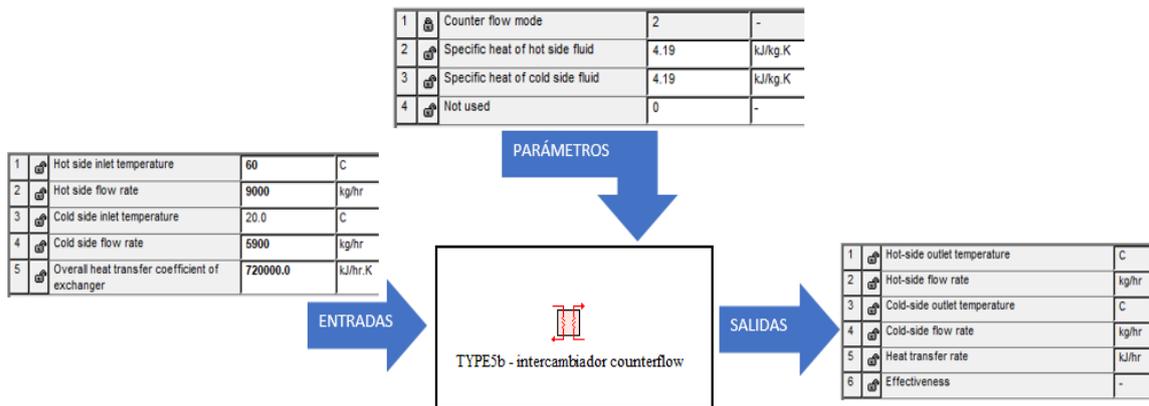


Figura 2-23 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 5b



TYPE24 - Integracion (sumas) de calores

TYPE24: Este fichero corresponde a un integrador matemático, y se encarga de integrar una variable a lo largo de un periodo de tiempo. Para el presente proyecto este integrador lo que hará será

integrar al cabo de un año los calores que son suministrados tanto por el captador solar como por el auxiliar a fin de luego poder ser posible obtener el factor f, que relaciona la acumulada de ambas variables.

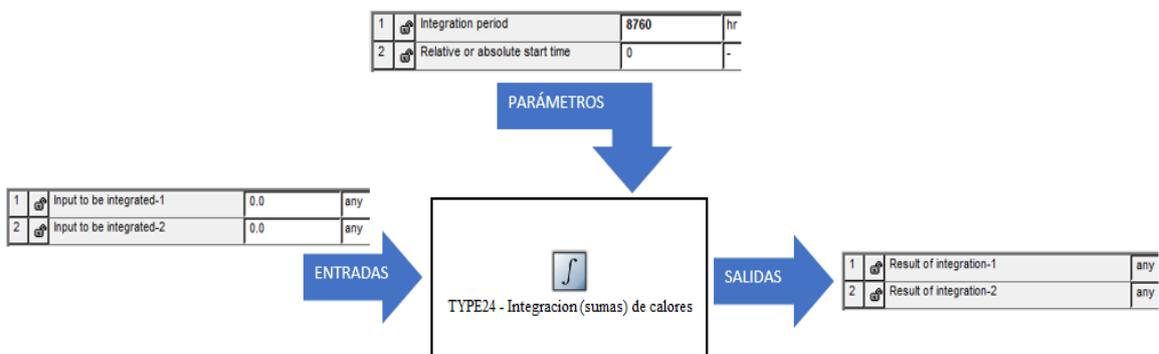


Figura 2-24 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 24



Ecu - Calculo de f

New equation: Este fichero es muy importante para el uso general de TRNSYS. Permite trabajar como un operador de funciones matemáticas, acepta variables de entrada y genera variables de salida.

Para este proyecto en particular este operador matemático se utilizó para establecer ecuaciones que permitieran:

- Crear variables de entrada establecidas en un valor determinado
- Vincular variables como dato del sistema para traducirse en variables que el sistema puede utilizar como variables de entrada
- Ser nexos entre las variables de salida del sistema y los ficheros graficadores.

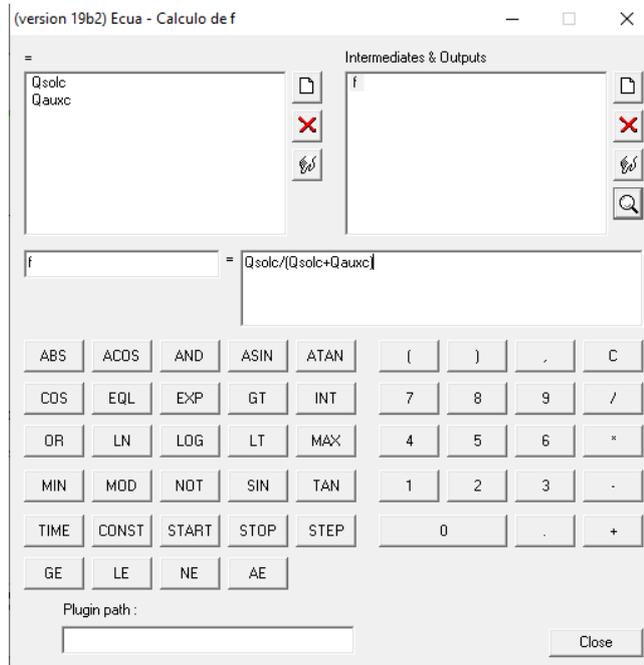


Figura 2-25 Relación de variables de entrada y salida del operador de Ecuaciones



Type65d

TYPE65d: Funciona como graficador de las variables en el tiempo. Es muy importante para TRNSYS ya que permite ver las variaciones con el tiempo de variables y comprobar que los resultados obtenidos son coherentes con la configuración de los demás ficheros, De no ser así permite evaluar las modificaciones que se efectúen en los ficheros. Permite comparar graficas de distintas variables, teniendo como eje independiente el tiempo y 2 ejes dependientes, uno a la derecha y otro a la izquierda.

Dentro de las variables graficadas para este proyecto tenemos:

- Temperaturas
- Caudales
- Ocupación
- Calores

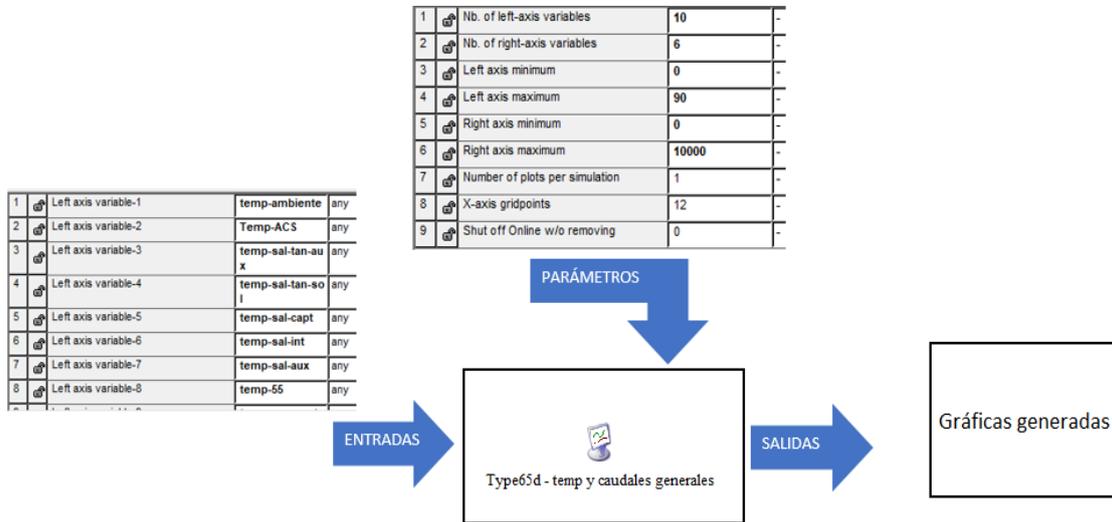


Figura 2-26 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 65d



Type25c - impresora de f

Type25c: Genera es un archivo de salida que pueda mostrar los resultados, en un intervalo de tiempo, punto por punto. Para este proyecto lo que se obtiene como resultado es una planilla de Excel que permite evaluar punto por punto la evolución del valor de f hasta el final de la simulación.

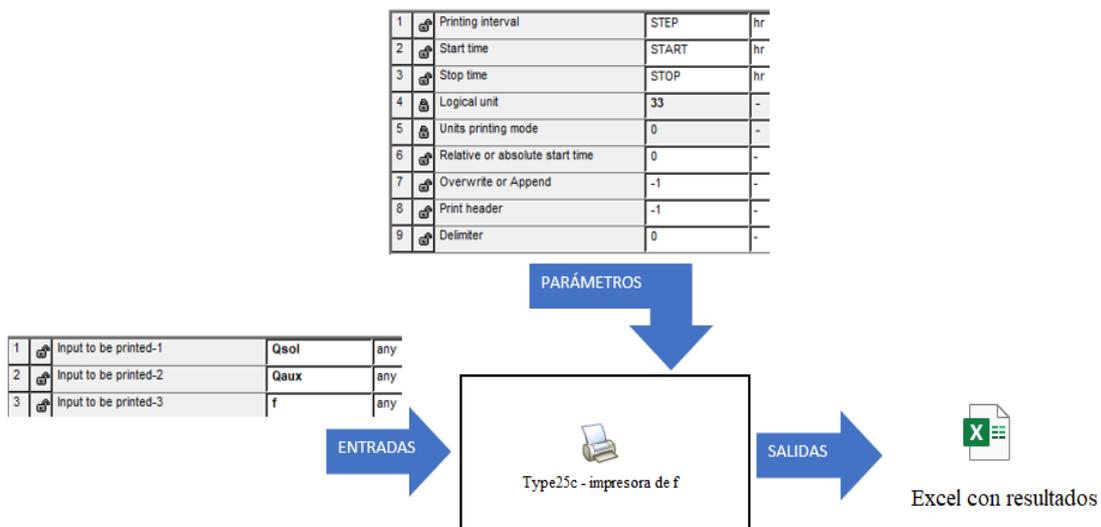


Figura 2-27 Relación de entradas, parámetros y salidas para el Type 25c

3 Modelado y simulación en TRNSYS

3.1 Introducción

En este capítulo se realiza un análisis del modelado de la instalación de energía en un hotel. Se definirán las características del edificio y de las instalaciones de calentamiento del agua del edificio.

Se analizará la evolución de las variables de interés de la simulación, en base anual y para cuatro días representativos del año. Se estudiará un caso base como representativo de la instalación obteniendo la contribución solar (porcentaje de demanda cubierta) de la instalación solar. A partir del análisis del caso base, se llevará a cabo un análisis paramétrico de las variables fundamentales de la instalación.

3.2 Definición del edificio

El edificio en el cual se basa este proyecto es una edificación preexistente y se trata del hotel Guadacorte Park. Esta edificación posee la categoría de hotel de 4 estrellas. Se encuentra situado en el kilómetro 114 de la carretera nacional 340 Cádiz-Barcelona, en el municipio que corresponde a Los Barrios en la provincia de Cádiz.



Figura 3-1 Ubicación del hotel Guadacorte, Los barrios, Cádiz, España

Los materiales utilizados para su construcción constan de: estructuras metálicas, hormigón armado, forjados de hormigón, cerramientos a base de

capuchina de ladrillo hueco doble con aislante térmico de espuma de poliuretano y tejados con tejas cerámicas árabes.

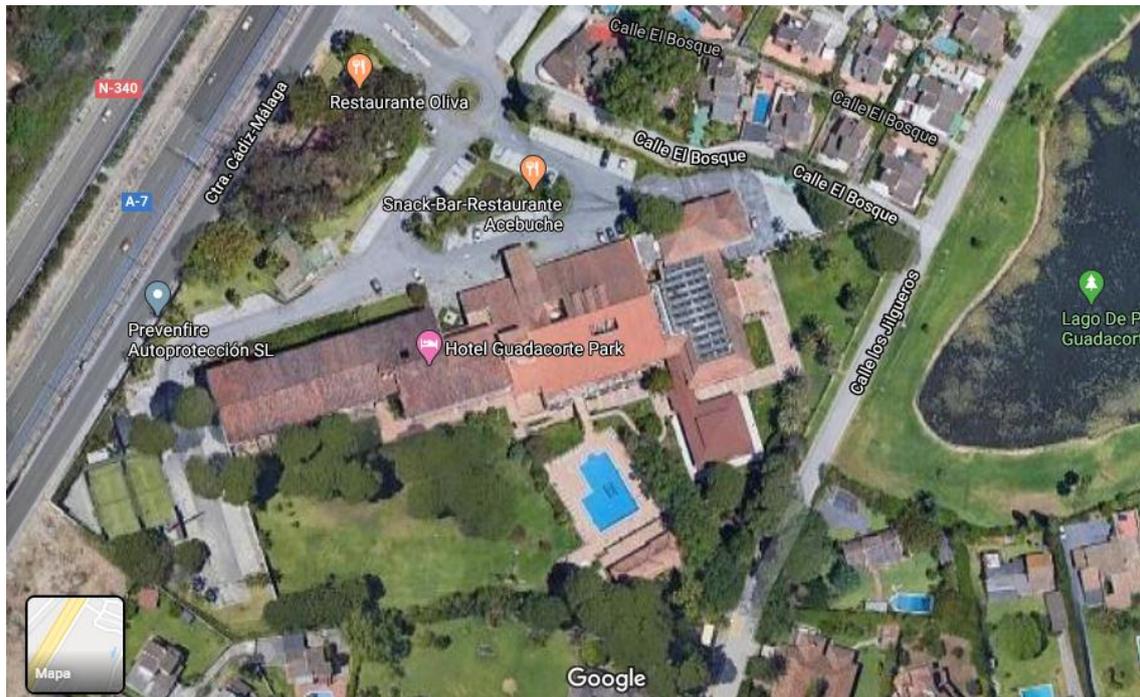


Figura 3-2 Vista satelital del Hotel Guadacorte

La composición del hotel es de 4 plantas las cuales abarcan: semisótano, planta baja, 1° planta y 2° planta. (Paez Rodriguez, 2001)

Hotel Guadacorte		
Planta	Habitación simple	Habitación doble
Semisótano	15	1
Planta baja	29	2
1° Planta	29	2
2° Planta	29	2
Total	102	7

Figura 3-3 Plazas disponibles en hotel Guadacorte (6)

Se considera que si bien el número de plazas disponibles es 116, debe además considerarse: zonas de personal, zona de lavandería, zona de bar. Estos servicios necesitan estar provistos de ACS por lo que el número real de ocupantes para considerar en el diseño en su momento de máxima ocupación será de 232.

En cuanto al perfil de ocupación que se adoptara en este edificio se considera la ocupación por mes reflejada en la figura 3-4.

mes	ocupación real
enero	116
febrero	116
marzo	139
abril	139
mayo	162
junio	162
julio	186
agosto	232
septiembre	162
octubre	139
noviembre	116
diciembre	116

Figura 3-4 Perfil de valores de ocupación por mes del hotel Guadacorte

Para la posterior obtención de la demanda se debe considerar lo que establece la CTE en cuanto a consumos unitarios de agua caliente y se verifica en la figura 3-5:

Para valorar las demandas se tomarán los valores unitarios que aparecen en la siguiente tabla (Demanda de referencia a 60 °C).

Tabla 4.1. Demanda de referencia a 60 °C⁽¹⁾

Criterio de demanda	Litros/día-unidad	unidad
Vivienda	28	Por persona
Hospitales y clínicas	55	Por persona
Ambulatorio y centro de salud	41	Por persona
Hotel *****	69	Por persona
Hotel ****	55	Por persona
Hotel ***	41	Por persona
Hotel/hostal **	34	Por persona
Camping	21	Por persona
Hostal/pensión *	28	Por persona
Residencia	41	Por persona
Centro penitenciario	28	Por persona
Albergue	24	Por persona
Vestuarios/Duchas colectivas	21	Por persona
Escuela sin ducha	4	Por persona
Escuela con ducha	21	Por persona
Cuarteles	28	Por persona
Fábricas y talleres	21	Por persona
Oficinas	2	Por persona
Gimnasios	21	Por persona
Restaurantes	8	Por persona
Cafeterías	1	Por persona



Consumos unitarios de agua caliente según CTE – HE4

(1) Los valores de demanda ofrecidos en esta tabla tienen la función de determinar la fracción solar mínima a abastecer mediante la aplicación de la tabla 2.1. Las demandas de ACS a 60 °C se han obtenido de la norma UNE 94002. Para el cálculo se ha utilizado la ecuación (3.2.) con los valores de $T_i = 12\text{ °C}$ (constante) y $T = 45\text{ °C}$.

Figura 3-5 Valor seleccionado de consumos de agua caliente por persona (4)

3.3 Esquema de la instalación

Para una rápida interpretación inicial, se debe evaluar la figura 3-6. Esta figura representa la simplificación de la instalación que luego será modelada en el software TRNSYS.

Este esquema representa de forma simbólica como están interconectados todos los elementos de la instalación que luego serán detallados en los siguientes incisos. Cabe destacar que en este esquema se presentan solo los elementos físicos del sistema.

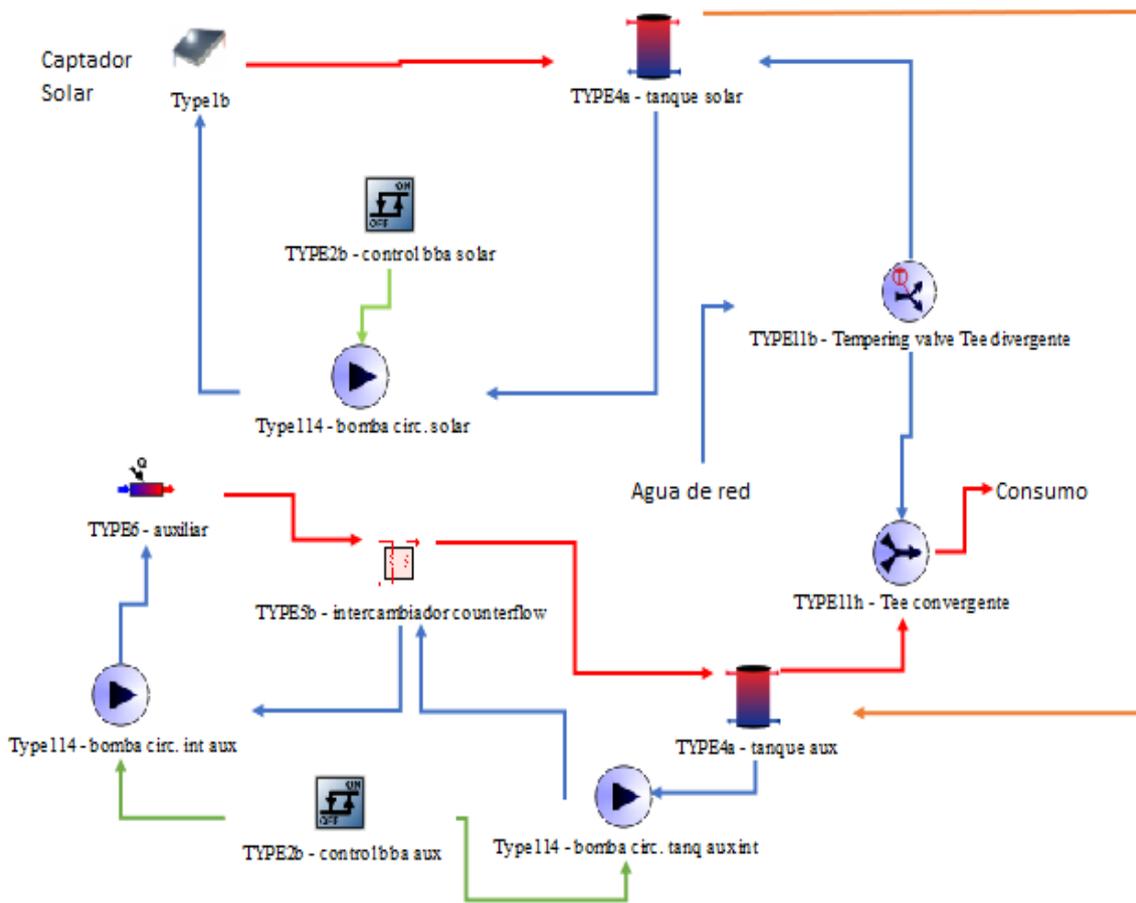


Figura 3-6 Esquema general simplificado de la instalación

El modelado, a diferencia de este esquema contiene una información mucho mayor y la interrelación de los elementos ficticios con los elementos reales.

3.4 Captación solar y acumulación solar

La captación solar del sistema está a cargo de los captadores solares en su conjunto, los captadores solares utilizados en este caso son los que disponen de la siguiente especificación (Figura 3-7).

Propiedad	Valor	Unidades
Caudal	50	l/hm ²
Área unitaria del colector	2,13	m ²
Cantidad	64	
Caudal global	6816	l/h
Caudal unitario	106,5	l/h

Figura 3-7 Tabla de características de los captadores termosolares

Estos captadores solares se agrupan de la forma como se establece en la figura 3-8. Esta distribución permite tener conexiones paralelo-serie, lo que hace que se utilicen distintos tamaños de tuberías de interconexión para el transporte de fluido.

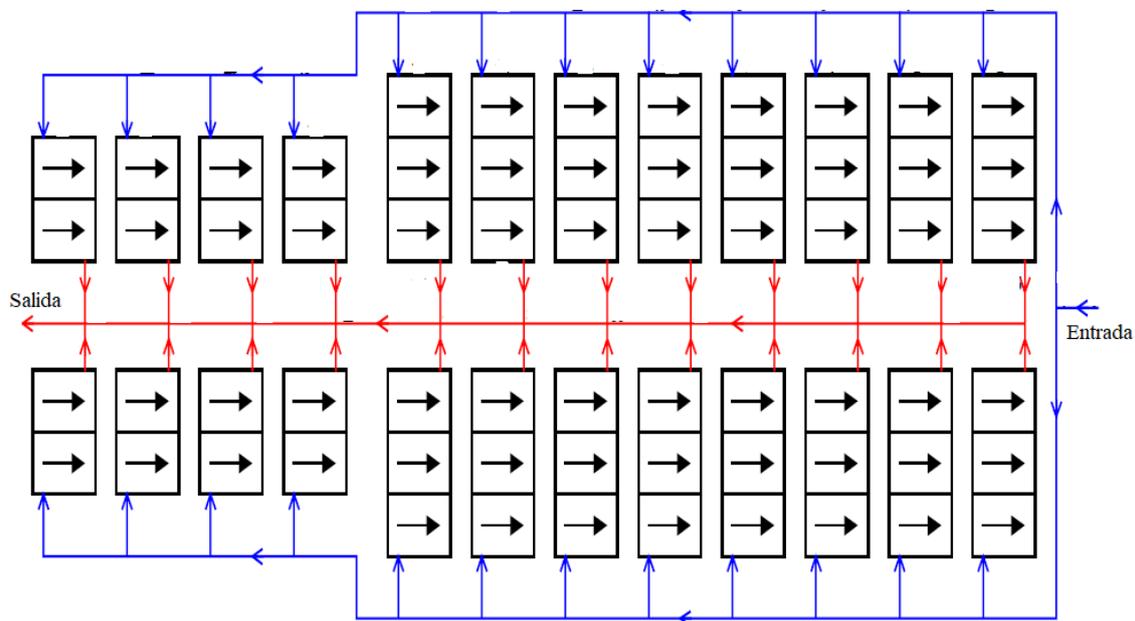


Figura 3-8 Distribución de captadores termosolares para el hotel Guadacorte (6)

La acumulación solar está a cargo de 3 depósitos conectados en serie que disponen de una capacidad individual de 3500 l, por lo que suman en total una capacidad de acumulación de 10.500 l. Estarán aislados con una espuma de poliuretano de 0,04 m.

3.5 Sistema auxiliar

Se instala un circuito indirecto con intercambiador dando lugar a dos circuitos que componen el sistema auxiliar. Está compuesto por 2 calderas con quemadores modulantes atmosféricos, que funcionan a base de gas propano. Su potencia nominal es de 100 kW.

A continuación, encontraremos una referencia para identificar cada línea en el esquema (Figura 3-9):

- **Línea Gruesa azul:** circuitos de agua fría
- **Línea Gruesa roja:** circuitos de agua caliente
- **Línea Gruesa naranja:** circuitos de agua que se dirigen desde el sistema primario hasta el sistema secundario
- **Línea delgada verde claro:** Identifican a los nexos de envío de información. Estas líneas no tienen existencia física, sino más bien son líneas ficticias que envían información de un fichero a otro.
- **Línea delgada verde oscuro:** Identifican a los nexos de envío de información. Estas líneas tienen existencia física, a diferencia de las anteriores necesitan de un medio físico para el envío de información, ya sean cables, sensores, algún tipo específico de hardware, etc.
- **Línea delgada negra:** Identifican a los nexos de envío de información. Estas líneas no tienen existencia física, sino más bien son líneas ficticias que envían información de un fichero a un fichero que funciona como graficador. Es decir, que la función de esta línea es llevar la información de variables que se desea graficar.

Línea gruesa azul	
Línea gruesa roja	
Línea gruesa naranja	
Línea delgada verde claro	
Línea delgada verde oscuro	
Línea delgada negra	

Figura 3-10 Cuadro de líneas de referencia del diagrama de TRNSYS

Se puede entonces pasar a identificar cada uno de los sistemas por separado, pero previamente hay que establecer unas consideraciones a ficheros que están como anexo a los sistemas. Primero haremos referencia a los ficheros que nos dan un punto de partida, como variables de entrada para el sistema primario. Estos ficheros abarcan 2 grupos:

El primer grupo (grupo 1) lo componen: el fichero meteorológico (Type9e), el fichero procesador solar (TYPE16c) y el fichero procesador psicométrico

(Type33d). Mediante este conjunto de ficheros se puede obtener las variables de entrada para muchos ficheros de todos los sistemas, pero principalmente para el captador solar que es parte del sistema primario.

Dentro de los parámetros importantes valores anuales) que se obtienen como salida de este conjunto de ficheros tenemos (Figura 3-11): temperaturas, humedad relativa y radiación solar.

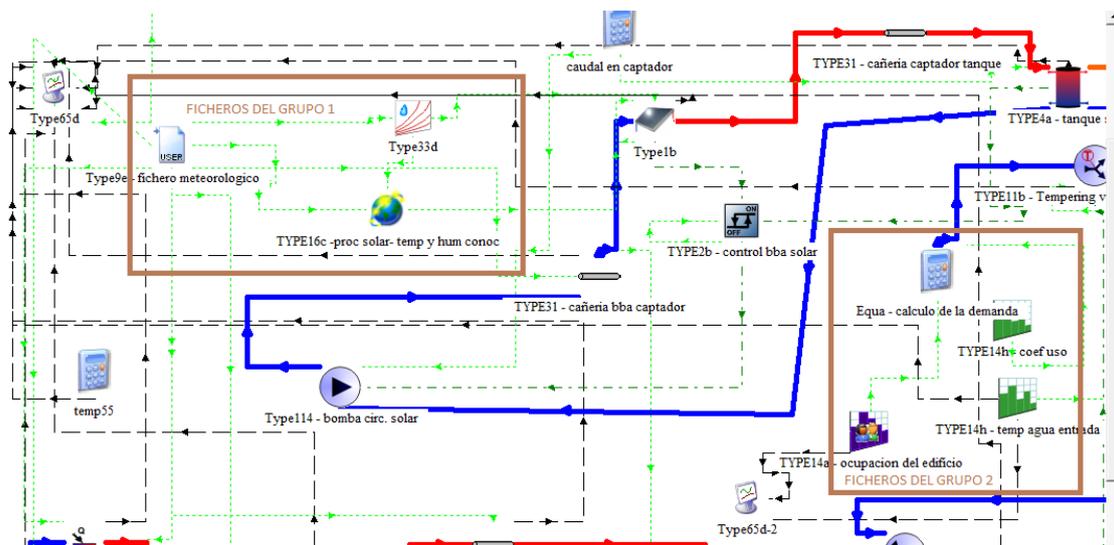


Figura 3-11 Representación de los ficheros del Grupo 1 y del Grupo 2

El segundo grupo (grupo 2) lo componen: El fichero de ocupación (TYPE14a), el fichero de variables en el tiempo (TYPE14h) y un fichero de un procesador de ecuaciones. Mediante este grupo se obtiene la demanda de agua que se necesita en cada instante del día al cabo de un año y la temperatura del agua de entrada al sistema al cabo de un año.

Es importante destacar que el fichero de procesador de ecuaciones es el principal nexo que une las variables y las traduce para la entrada a la tee Tempering valve, por esto a continuación se analiza dicha configuración (Figura 3-12):

Comenzaremos entonces a describir el sistema primario: el sistema primario está compuesto por los siguientes componentes:

- Un tanque de acumulación
- Una bomba
- Tuberías
- Un controlador de apagado y encendido de la bomba
- Un captador solar

Para evaluar este conjunto en cuanto a su funcionamiento tomaremos como partida la salida de agua fría del tanque que se dirige hacia la bomba. La

bomba garantiza la presión y el caudal constantes de todo el circuito en los momentos de funcionamiento, luego de la bomba este fluido, que en este caso es agua, se dirige a la entrada del captador solar.

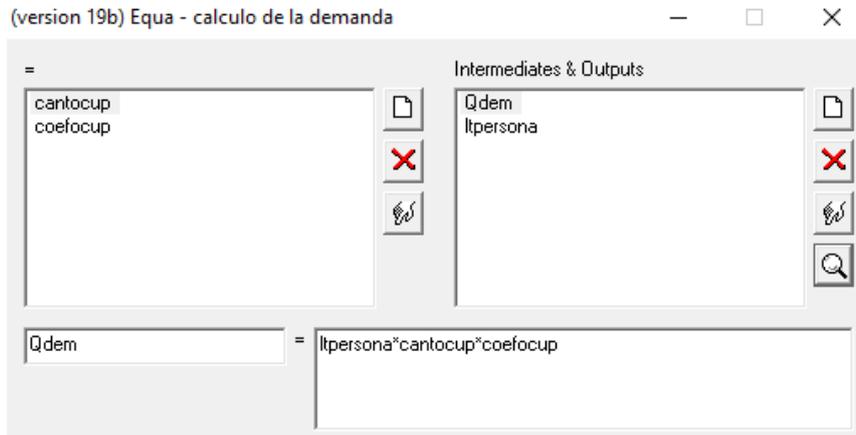


Figura 3-12 Configuración del procesador de cálculo para establecer la demanda de ACS

En el captador solar el fluido es calentado por la captación de la radiación proveniente del exterior, pero cuando se calienta este fluido será función varios factores, pero principalmente de la radiación que capta desde el exterior. Este motivo hace que sea indispensable tener la Tee tempering valve que permita luego en caso de ser necesario la mezcla con agua fría (la cual se realizara en la tee convergente), esto claramente que es el caso de que el captador solar caliente de más el agua por el exceso de radiación solar en el ambiente.

Sin la tee tempering valve podría suceder que en los meses de mucha radiación (ejemplos son julio o agosto) se obtenga agua a una temperatura mayor a la de consigna para el usuario (Figura 3-13).

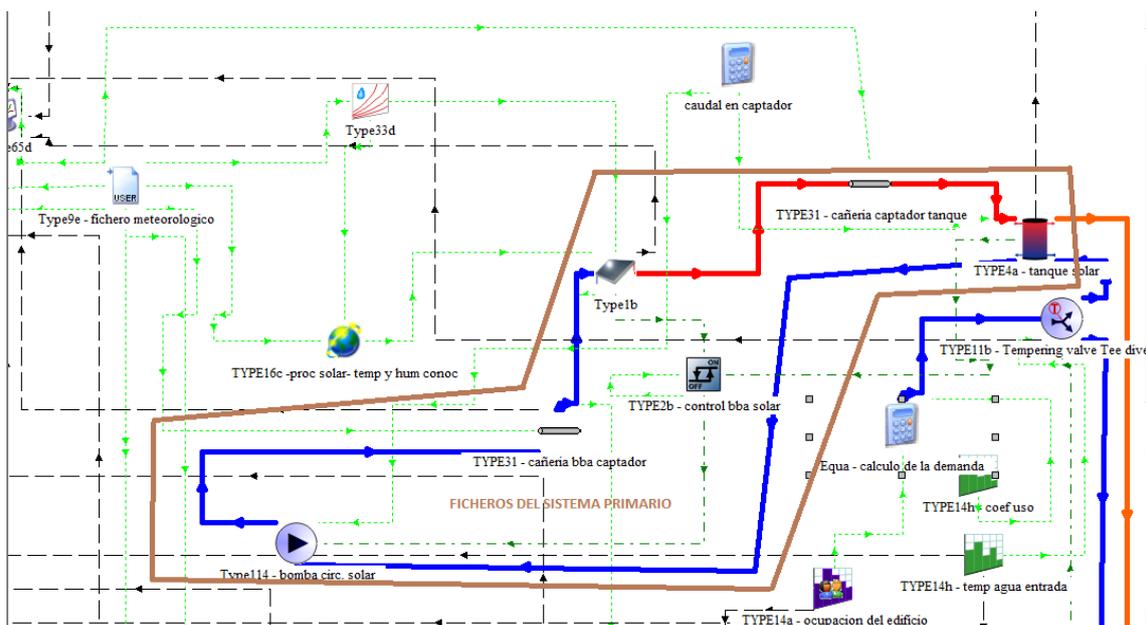


Figura 3-13 Ficheros del sistema primario

Luego de ser calentada el agua en el captador solar esta vuelve a ingresar al tanque de acumulación. Todo este transporte de fluido se realiza mediante tuberías las cuales solo están representadas para la simulación donde hay tramos no despreciables de tuberías que conectan un fichero con otro.

La salida del tanque de acumulación del sistema primario se dirige hacia el tanque de acumulación del sistema secundario y es su entrada de agua para este tanque.

Podemos entonces identificar como está compuesto el sistema secundario, pero debemos destacar cuales son los circuitos (Figura 3-14):

El primer circuito está compuesto por:

- Auxiliar
- Tuberías
- Bomba
- Intercambiador

El segundo circuito está compuesto por:

- Controlador
- Tuberías
- Tanque de acumulación solar
- Bomba

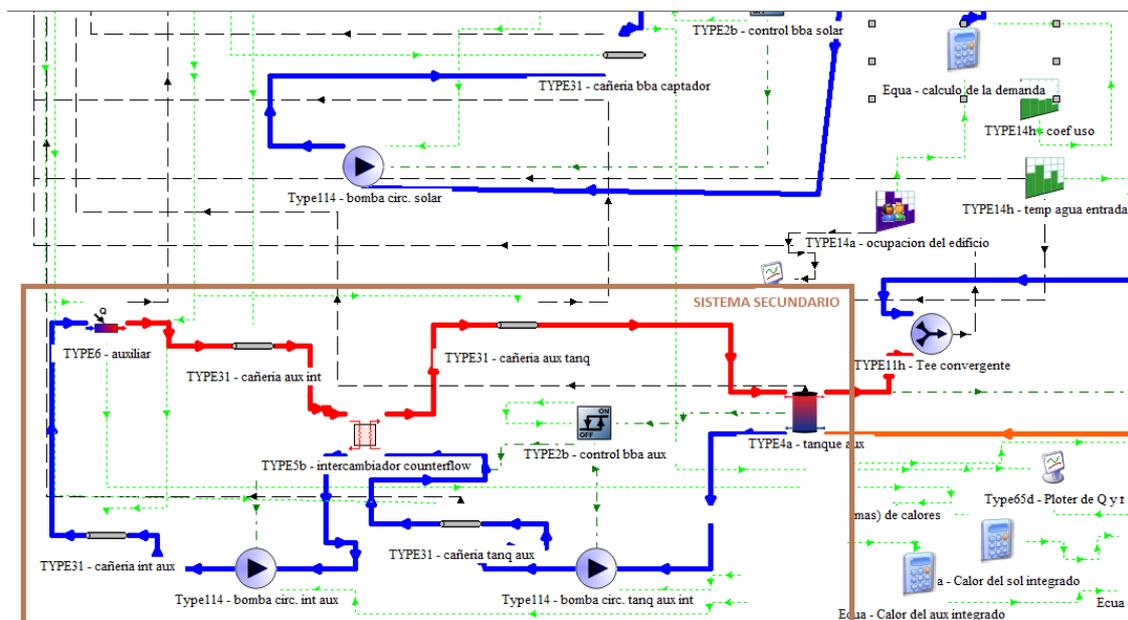


Figura 3-14 Ficheros del sistema secundario

Explicaremos que sucede con el primer circuito: como punto de partida tomaremos la salida de agua fría del intercambiador que se dirige hacia la bomba. La bomba garantiza la presión y caudal constante en todo el circuito para los momentos de funcionamiento. La salida de la bomba es la entrada del auxiliar donde se calienta el fluido por medio de calderas a combustión de gas, donde se le aporta el calor al agua que pasa a ser agua caliente a una temperatura máxima de 60°C y con un aporte de calor de 720.000 kJ/h.

La salida del auxiliar se dirige al intercambiador por ser esta su entrada de agua caliente. El intercambiador a contracorriente es el único nexo con el circuito secundario; garantizar que las corrientes de agua no se mezclen, lo que permite un mantenimiento adecuado para todo el sistema.

El segundo circuito lo podemos evaluar tomando como punto de partida la salida de agua fría del tanque de acumulación. Esta como en los demás circuitos se dirige hacia la bomba del circuito cumpliendo la misma función que en el primer circuito. La salida de esta bomba es luego la entrada de agua fría al intercambiador el cual a contracorriente se calienta con la corriente de agua caliente que proviene del auxiliar, luego esta corriente sale caliente del intercambiador y llega al tanque de acumulación del sistema auxiliar.

Cabe aclarar que el sistema de control debe activar las bombas en caso que sea necesario: en casos donde haya demanda de agua y el sistema primario no brinde el calor necesario o, que el sistema primario no esté en funcionamiento y haya demanda de agua y sea necesario calentar el agua.

En la salida del tanque del secundario el agua debe salir a una temperatura igual o mayor que la de temperatura de consigna. En caso de ser igual al valor de consigna de la temperatura, al llegar esta salida a la tee convergente debe seguir su paso sin mezclarse con ninguna corriente fría. Pero en caso de salir con una temperatura mayor a la de consigna debe llegar en la tee convergente una corriente fría para mezclarse con la corriente caliente y lograr a la salida de la tee convergente la temperatura de consigna.

Queda entonces aclarar que hay un grupo de ficheros que llamaremos el grupo 3, este grupo de ficheros son: ficheros procesadores de ecuaciones, Fichero integrador (TYPE24), fichero graficador (Type65d) y un fichero para imprimir (Type25c). (Figura 3-15).

Este grupo de ficheros se encarga de obtener el valor de f , obteniendo los valores acumulados de los calores tanto del auxiliar y del captador y se utiliza la siguiente fórmula para la obtención de f :

$$f = \frac{Q_{cap}}{Q_{cap} + Q_{aux}}$$

Este valor de f es graficado y se imprime en un archivo de Excel.

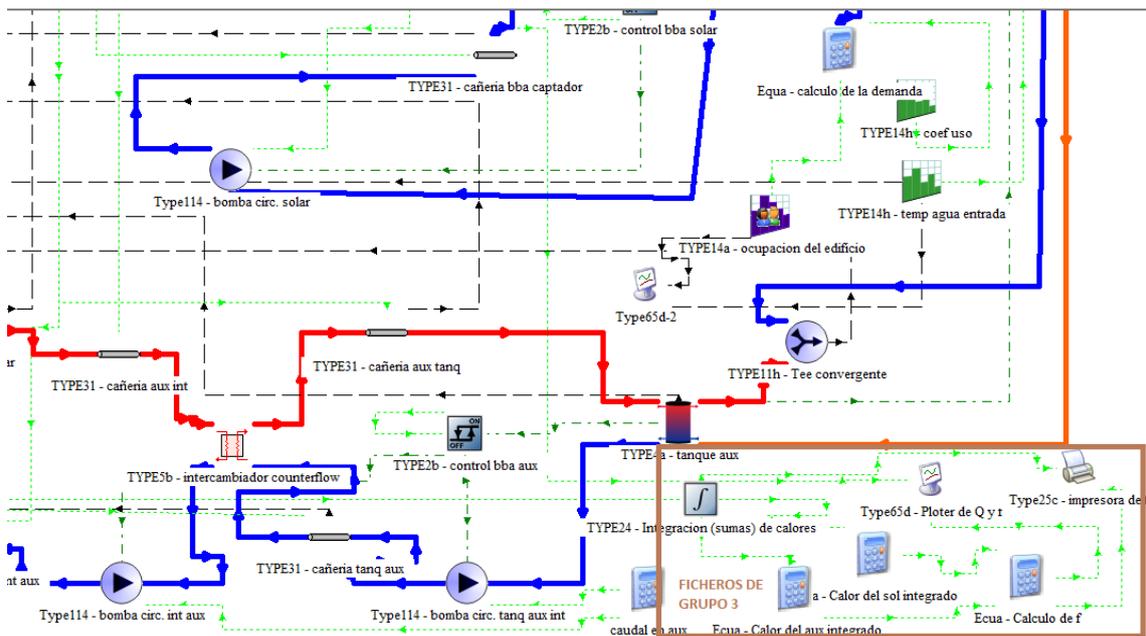


Figura 3-15 Ficheros del grupo 3

3.7 Análisis de gráficas

Para el análisis de los resultados obtenidos de la simulación analizaremos cómo evoluciona la simulación en valores anuales en cuanto a gráficas que representen: caudales, temperaturas, ocupación, calores y valores de f.

Evaluaremos entonces los siguientes parámetros al cabo de 1 año:

- La temperatura ambiente (Figura 3-16)

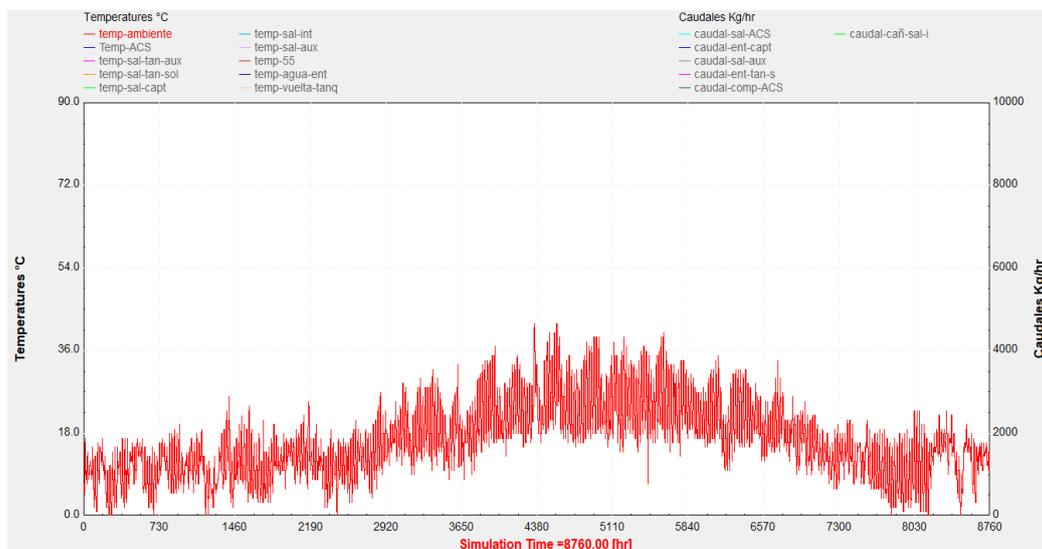


Figura 3-16 Evolución de la temperatura ambiente

b. La temperatura del agua de entrada al sistema (Figura 3-17)

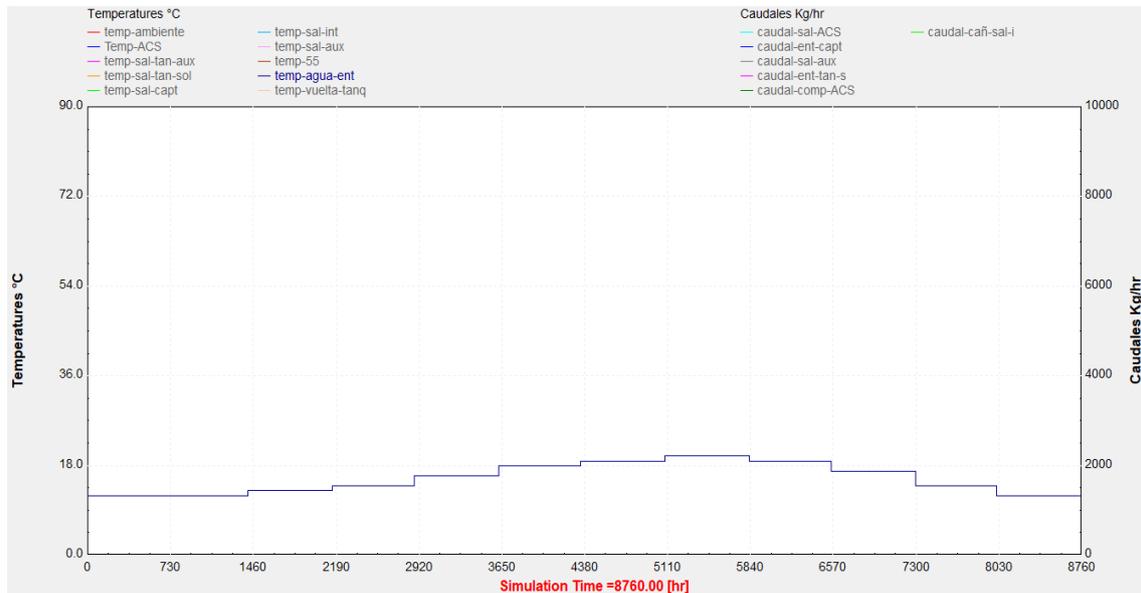


Figura 3-17 Evolución de la temperatura del agua de entrada de la red de agua

c. Cálculo de la demanda: para el cálculo de la demanda y obtener la gráfica correspondiente se necesitan tomar en cuenta previamente datos del sistema que estableceremos en las 2 graficas siguientes, considerando que para un hotel de 4 estrellas el consumo por persona es de 55 litros por día:

- Ocupación del edificio en el año (véase la figura 3-18):

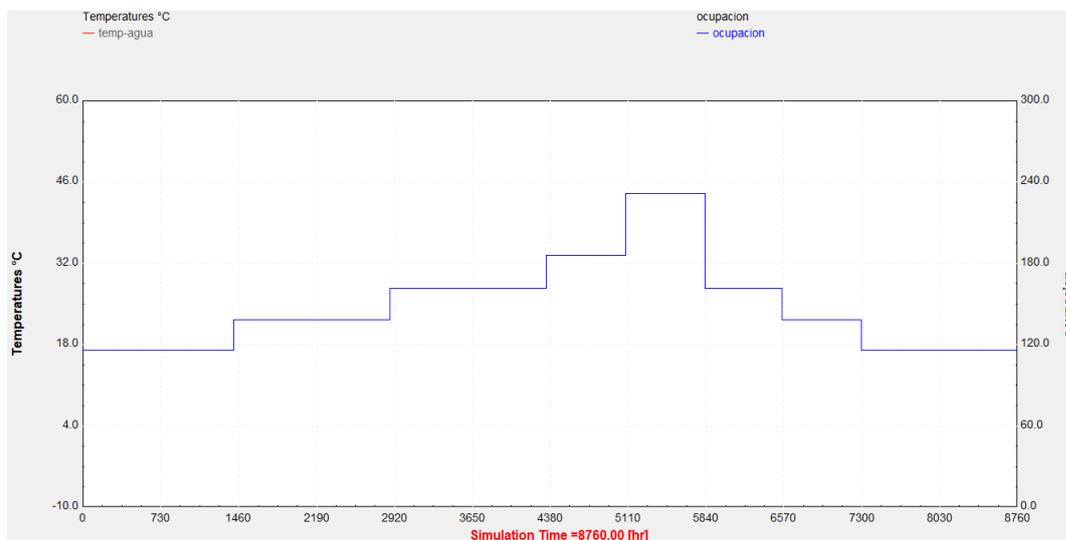


Figura 3-18 Ocupación del edificio

Considerando que es un hotel que está en una zona costera con acceso cercano a la playa, tiene sentido que la demanda mayor se encuentre en los meses de julio y agosto.

- Perfil del consumo diario de agua caliente (Figura 3-19):



Figura 3-19 Perfil de consumo diario de ACS

Este es un perfil tipo que adoptaremos para la simulación en TRNSYS, en el cual se ve cuáles son los horarios de mayor consumo cuando la mayoría de la gente comienza su día y luego cuando vuelve al hotel para hacer uso de las instalaciones.

Podemos entonces proceder a obtener la demanda de agua anual para este caso para un año (Figura 3-20):

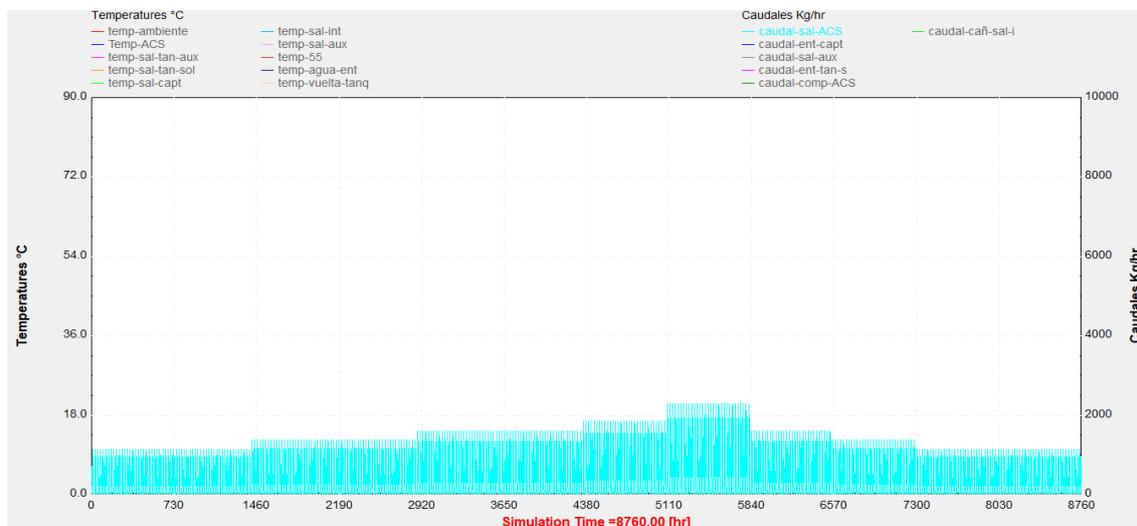


Figura 3-20 Demanda anual de ACS

3.8 Curvas del caso base

Veremos entonces las curvas que se pueden obtener para un caso base donde se darán valores anuales para el sistema y luego valores para 4 días del año donde focalizaremos a modo de ejemplo y que nos permita hacer zoom en el comportamiento de las variables en periodos de tiempo más pequeños.

Sera necesario entonces comenzar dando los datos para la simulación del caso base. Para esto veremos imágenes de la configuración de los principales ficheros del sistema (considerar que algunos valores pueden modificarse por entradas provenientes de otros ficheros):

- Captador solar (Figuras 3-21 y 3-22):

(version 19b) Type1b

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Number in series	1	-			More...
2	Collector area	136	m ²			More...
3	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K			More...
4	Efficiency mode	1	-			More...
5	Tested flow rate	50.0	kg/hr.m ²			More...
6	Intercept efficiency	0.74	-			More...
7	Efficiency slope	4	kJ/hr.m ² .K			More...
8	Efficiency curvature	0.05	kJ/hr.m ² .K ²			More...
9	Optical mode 2	2	-			More...

Figura 3-21 Parámetros del fichero Type1b

(version 19b) Type1b

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Inlet temperature	20.0	C			More...
2	Inlet flowrate	6816	kg/hr			More...
3	Ambient temperature	10.0	C			More...
4	Incident radiation	0.	kJ/hr.m ²			More...
5	Total horizontal radiation	0.0	kJ/hr.m ²			More...
6	Horizontal diffuse radiation	0.0	kJ/hr.m ²			More...
7	Ground reflectance	0.2	-			More...
8	Incidence angle	345	degrees			More...
9	Collector slope	45	degrees			More...

Figura 3-22 Variables de entrada del fichero Type1b

- Sistema de control del primario (Figuras 3-23 y 3-24):

(version 19b) TYPE2b - control bba solar

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	No. of oscillations	5	-			More...
2	High limit cut-out	57	C			More...

Figura 3-23 Parámetros del fichero TYPE2b

(version 19b) TYPE2b - control bba solar

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Upper input temperature Th	80	C			More...
2	Lower input temperature Tl	10.0	C			More...
3	Monitoring temperature Tin	20.0	C			More...
4	Input control function	0	-			More...
5	Upper dead band dT	7	Temp. Difference			More...
6	Lower dead band dT	0	Temp. Difference			More...

Figura 3-24 Variables de entrada del fichero TYPE2b

- Tanque del sistema primario (Figuras 3-25, 3-26 y 3-27):

(version 19b) TYPE4a - tanque solar

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Fixed inlet positions	1	-			More...
2	Tank volume	10.5	m ³			More...
3	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K			More...
4	Fluid density	1000.0	kg/m ³			More...
5	Tank loss coefficient	5.013	kJ/hr.m ² .K			More...
6	Height of node-1	0.80	m			More...
7	Height of node-2	0.80	m			More...
8	Height of node-3	0.80	m			More...
9	Auxiliary heater mode	1	-			More...
10	Node containing heating element 1	1	-			More...
11	Node containing thermostat 1	1	-			More...
12	Set point temperature for element 1	55.0	C			More...
13	Deadband for heating element 1	5.0	deltaC			More...
14	Maximum heating rate of element 1	0	kJ/hr			More...
15	Node containing heating element 2	1	-			More...
16	Node containing thermostat 2	1	-			More...
17	Set point temperature for element 2	55.0	C			More...
1 How many temperature levels (nodes) should be used in the tank?		3				

Figura 3-25 Parámetros del fichero TYPE4a

(version 19b) TYPE4a - tanque solar

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
15	Node containing heating element 2	1	-			More...
16	Node containing thermostat 2	1	-			More...
17	Set point temperature for element 2	55.0	C			More...
18	Deadband for heating element 2	5.0	deltaC			More...
19	Maximum heating rate of element 2	0	kJ/hr			More...
20	Not used (Flue UA)	0.0	W/K			More...
21	Not used (Tflue)	20.0	C			More...
22	Boiling point	100.0	C			More...

1 How many temperature levels (nodes) should be used in the tank? 3

Figura 3-26 Parámetros del fichero TYPE4a (continuación)

(version 19b) TYPE4a - tanque solar

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Hot-side temperature	45.0	C			More...
2	Hot-side flowrate	6816	kg/hr			More...
3	Cold-side temperature	20.0	C			More...
4	Cold-side flowrate	100.0	kg/hr			More...
5	Environment temperature	22.0	C			More...
6	Control signal for element-1	0.0	-			More...
7	Control signal for element-2	0.0	-			More...

1 How many heating elements to be modeled in this tank? 2

Figura 3-27 Variables de entrada del fichero TYPE4a

- Tempering valve tee (véase las figuras 3-28 y 3-29):

(version 19b) TYPE11b - Tempering valve Tee divergente

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Tempering valve mode	4	-			More...
2	Nb. of oscillations allowed	7	-			More...

Figura 3-28 Parámetros del fichero TYPE11b

(version 19b) TYPE11b - Tempering valve Tee divergente

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Inlet temperature	20.0	C	More...		
2	Inlet flow rate	100.0	kg/hr	More...		
3	Heat source temperature	55.0	C	More...		
4	Set point temperature	55	C	More...		

Figura 3-29 Variables de entrada del fichero TYPE11b

- Auxiliar del sistema secundario (Figuras 3-30 y 3-31):

(version 19b) TYPE6 - auxiliar

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Maximum heating rate	720000	kJ/hr	More...		
2	Specific heat of fluid	4.19	kJ/kg.K	More...		
3	Overall loss coefficient for heater during operation	0.0	kJ/hr.K	More...		
4	Efficiency of auxiliary heater	0.79	-	More...		

Figura 3-30 Parámetros del fichero TYPE6

(version 19b) TYPE6 - auxiliar

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Inlet fluid temperature	20.0	C	More...		
2	Fluid mass flow rate	9000	kg/hr	More...		
3	Control Function	1	-	More...		
4	Set point temperature	60	C	More...		
5	Temperature of surroundings	20.0	C	More...		

Figura 3-31 Variables de entrada del fichero TYPE6

- Intercambiador del sistema secundario (Figura 3-32):

(version 19b) TYPE5b - intercambiador counterflow

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Hot side inlet temperature	60	C	More...		
2	Hot side flow rate	9000	kg/hr	More...		
3	Cold side inlet temperature	20.0	C	More...		
4	Cold side flow rate	5900	kg/hr	More...		
5	Overall heat transfer coefficient of exchanger	720000.0	kJ/hr.K	More...		

Figura 3-32 Variables de entrada del fichero TYPE5b

- Sistema de control del secundario (Figuras 3-33 y 3-34):

(version 19b) TYPE2b - control bba aux

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	No. of oscillations	5	-			More...
2	High limit cut-out	62	C			More...

Figura 3-33 Parámetros del fichero TYPE2b

(version 19b) TYPE2b - control bba aux

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Upper input temperature Th	60	C			More...
2	Lower input temperature Tl	10.0	C			More...
3	Monitoring temperature Tin	20.0	C			More...
4	Input control function	0	-			More...
5	Upper dead band dT	5	Temp. Difference			More...
6	Lower dead band dT	1	Temp. Difference			More...

Figura 3-34 Variables de entrada del fichero TYPE2b

- Tanque del sistema secundario (véase las figuras 3-35 y 3-36):

(version 19b) TYPE4a - tanque aux

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Hot-side temperature	55	C			More...
2	Hot-side flowrate	5900	kg/hr			More...
3	Cold-side temperature	20.0	C			More...
4	Cold-side flowrate	0	kg/hr			More...
5	Environment temperature	22.0	C			More...
6	Control signal for element-1	0.0	-			More...
7	Control signal for element-2	0.0	-			More...

1	How many heating elements to be modeled in this tank?	2
---	---	---

Figura 3-35 Variables de entrada del fichero TYPE4a

(version 19b) TYPE4a - tanque aux

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Fixed inlet positions	1	-			More...
2	Tank volume	4	m ³			More...
3	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K			More...
4	Fluid density	1000.0	kg/m ³			More...
5	Tank loss coefficient	5.043	kJ/hr.m ² .K			More...
6	Height of node-1	0.80	m			More...
7	Height of node-2	0.80	m			More...
8	Height of node-3	0.80	m			More...
9	Auxiliary heater mode	1	-			More...
10	Node containing heating element 1	1	-			More...
11	Node containing thermostat 1	1	-			More...
12	Set point temperature for element 1	55.0	C			More...
13	Deadband for heating element 1	5.0	deltaC			More...
14	Maximum heating rate of element 1	0	kJ/hr			More...
15	Node containing heating element 2	1	-			More...
16	Node containing thermostat 2	1	-			More...
17	Set point temperature for element 2	55.0	C			More...
18	Deadband for heating element 2	5.0	deltaC			More...
19	Maximum heating rate of element 2	0	kJ/hr			More...
20	Not used (Flue UA)	0.0	W/K			More...
21	Not used (Tflue)	20.0	C			More...
22	Boiling point	100.0	C			More...

1 How many temperature levels (nodes) should be used in the tank? 3

Figura 3-36 Parámetros del fichero TYPE4a

Ya tenemos toda la información de los ficheros importantes solo resta ingresar una data correspondiente a la acción control cards de TRNSYS, que nos dará una idea del entorno en que estamos realizando la simulación y de lo que nos interesa para el presente proyecto es la siguiente imagen (Figura 3-37):

Global Infos

Control Cards	Project	Component Order
1	Simulation start time	0 hr More...
2	Simulation stop time	8760 hr More...
3	Simulation time step	0.25 hr More...
4	Solution method	<input checked="" type="radio"/> Successive <input type="radio"/> Powell's me More...
5	The minimum relaxation factor	1 - More...
6	The maximum relaxation factor	1 - More...
7	Equation solver	0 - More...
8	Equation trace	<input type="radio"/> True <input checked="" type="radio"/> False More...

Figura 3-37 Configuración del entorno de TRNSYS

Con los datos disponibles es posible obtener las gráficas de las variables de interés de todo el sistema:

Valores al cabo de 1 año

- Temperatura de la salida del captador (Figura 3-38):

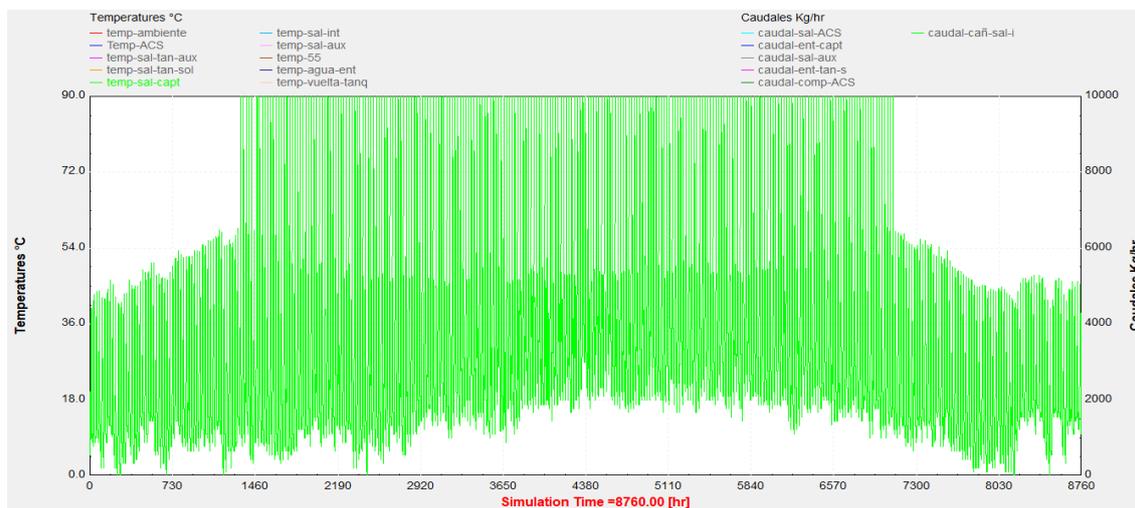


Figura 3-38 Evolución de la temperatura del agua a la salida del captador solar

Se observa que en ciertos momentos del año la radiación captada permite calentar el agua para ACS por encima del de consigna, pero en momentos de los primeros y últimos meses del año es necesaria la acción del auxiliar.

- Temperatura de la salida del auxiliar (Figura 3-39):

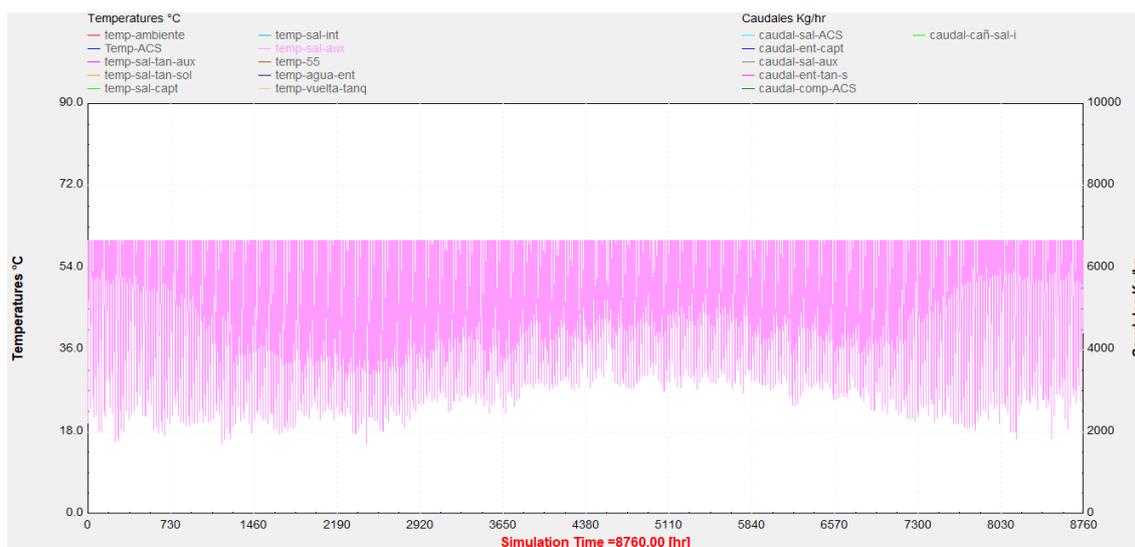


Figura 3-39 Evolución de la temperatura de la salida del auxiliar

- Temperatura de la salida del tanque del primario (Figura 3-40):

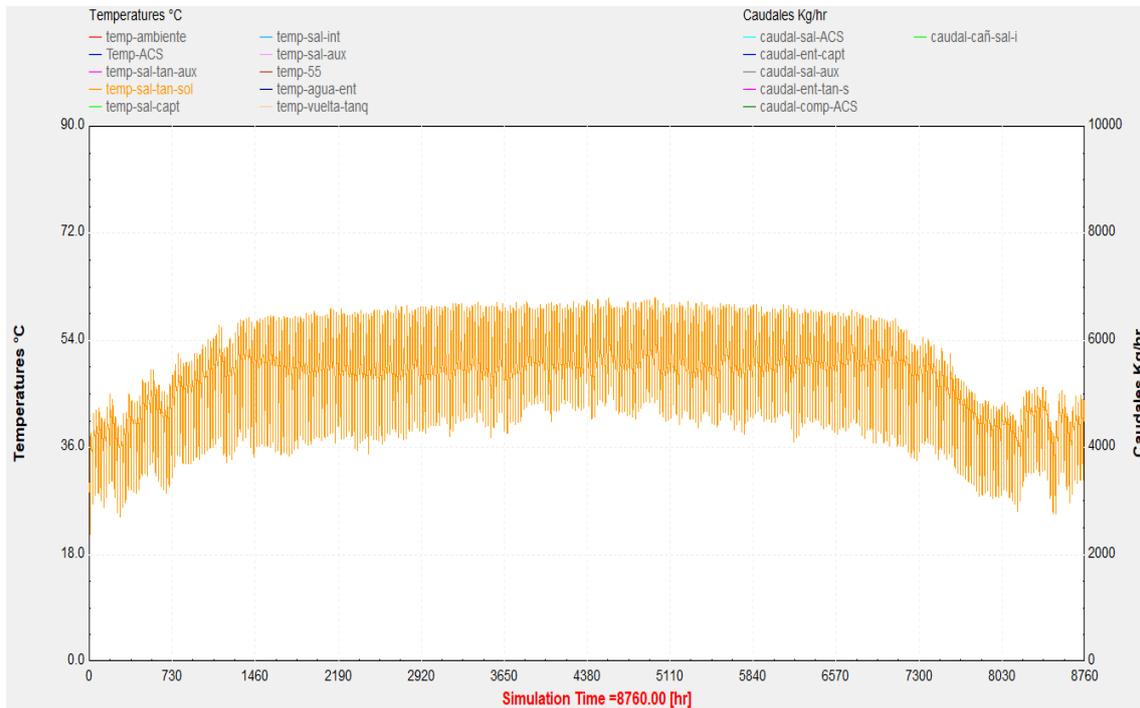


Figura 3-40 Evolución de la temperatura de salida de agua del tanque primario

- Temperatura de la salida del tanque del secundario (Figura 3-41):

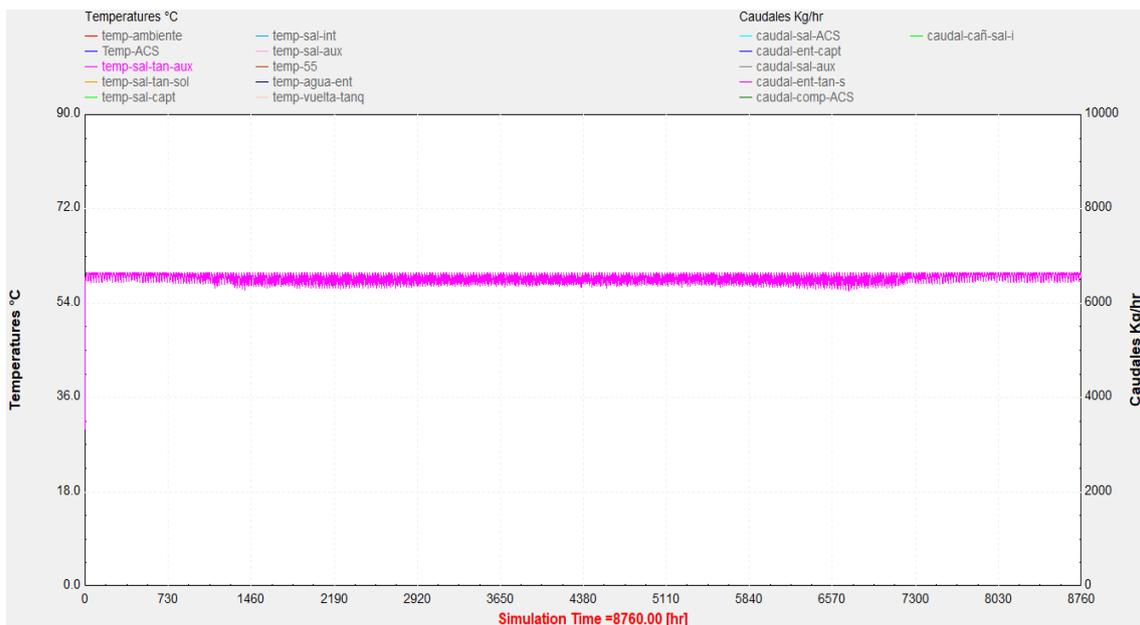


Figura 3-41 Temperatura de la salida de agua del tanque del secundario

- Temperatura del agua caliente sanitaria (Figura 3-42):

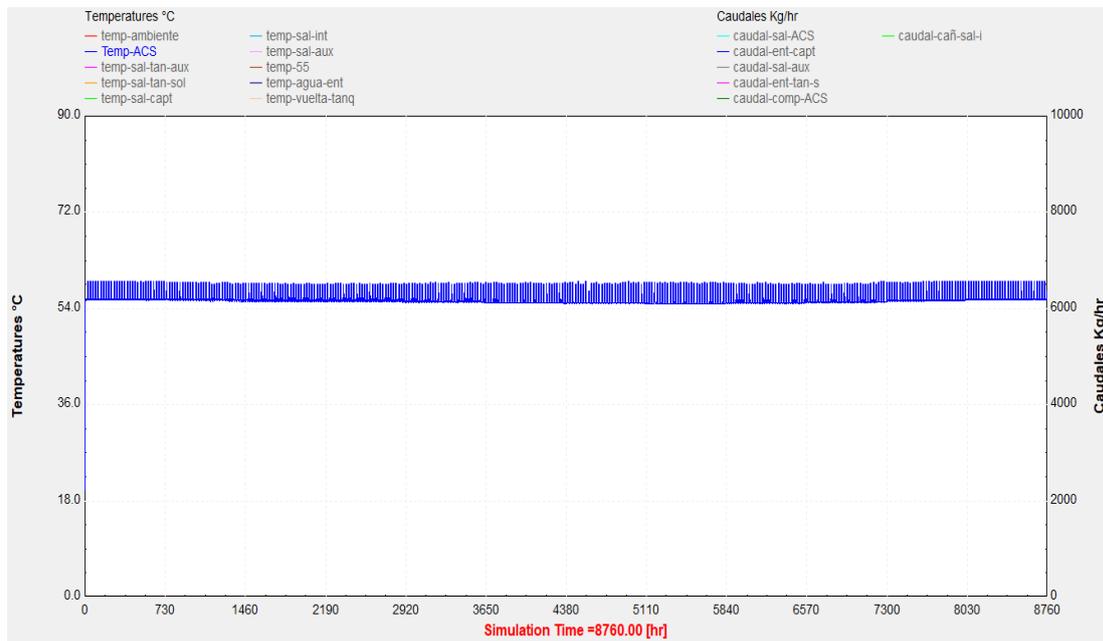


Figura 3-42 Temperatura del ACS para el consumo del edificio

Esta grafica es muy similar a la gráfica de la temperatura del tanque del secundario. La diferencia radica en que hay un caudal de agua fría que se mezcla con la salida de agua del tanque del secundario en el tee convergente. Esto hace que la gráfica se mantenga en operación al valor de 55°C.

- Caudal del sistema primario (Figura 3-43):

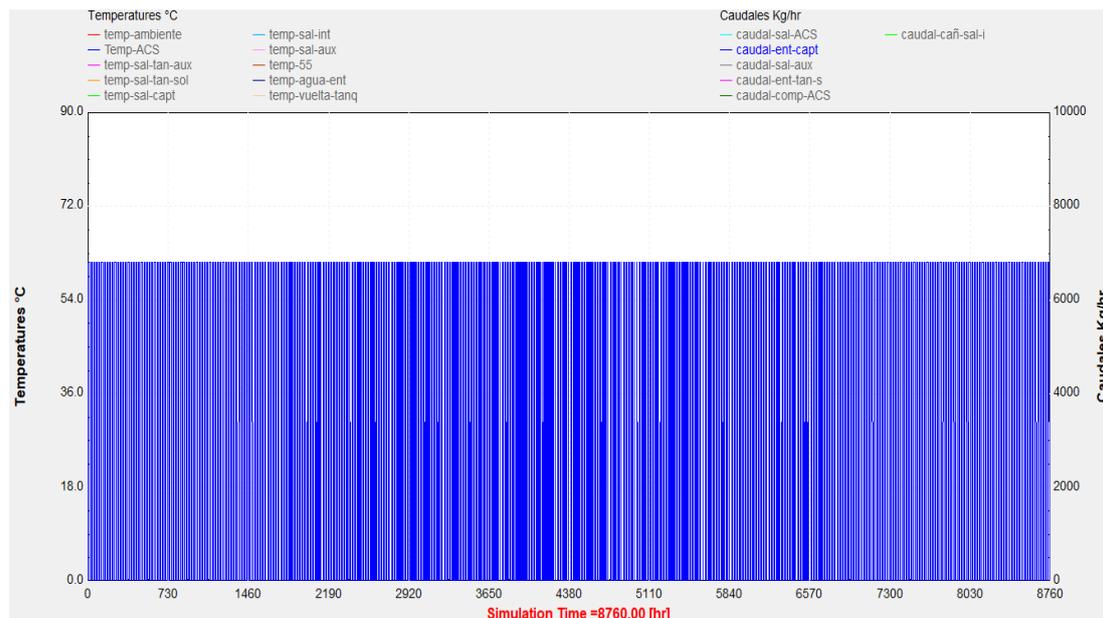


Figura 3-43 Caudal del sistema primario

- Caudal del circuito primario del sistema secundario (Figura 3-44):

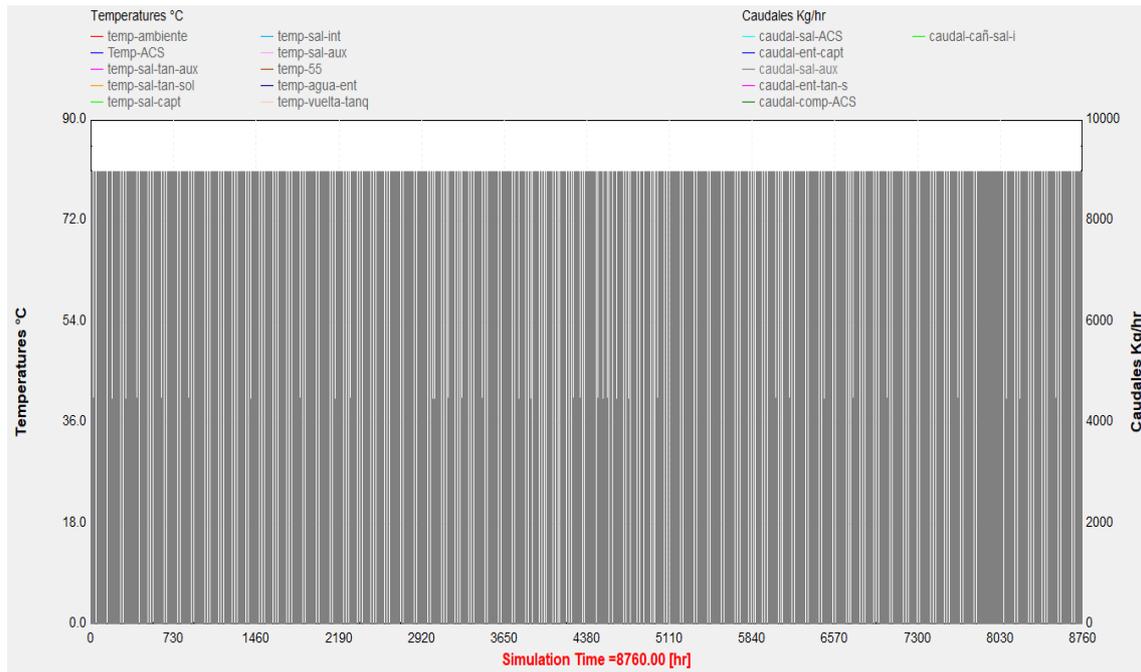


Figura 3-44 Caudal del circuito primario del sistema secundario (circuito del auxiliar)

- Caudal del circuito secundario del sistema secundario (Figura 3-45):

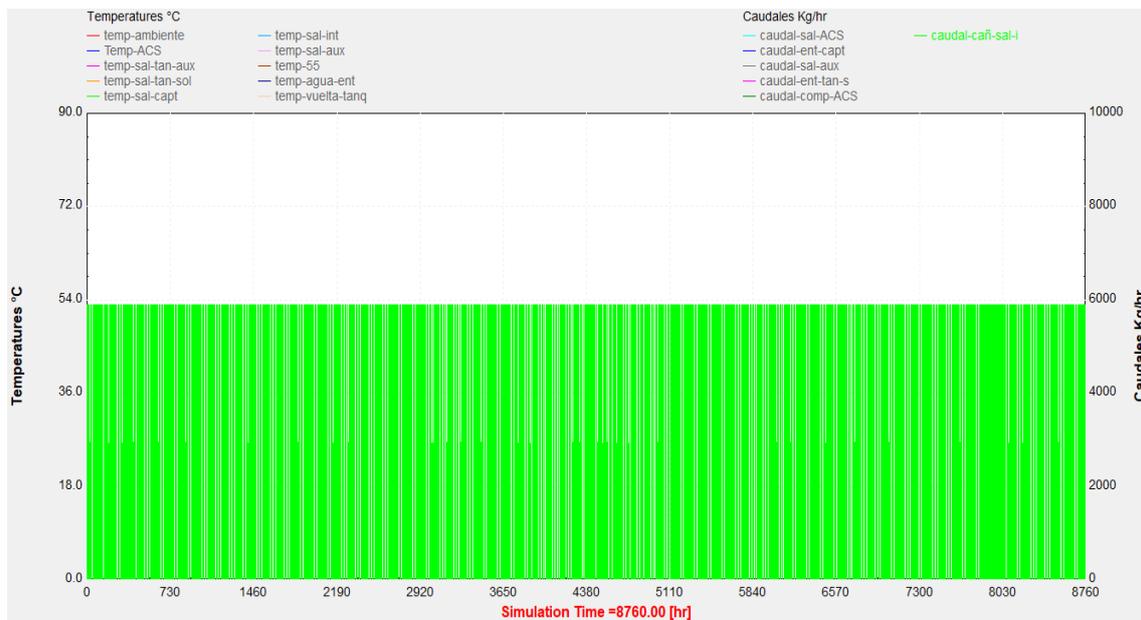


Figura 3-45 Caudal del circuito secundario del sistema secundario

- Caudal de agua fría desde la tee tempering valve (Figura 3-46):

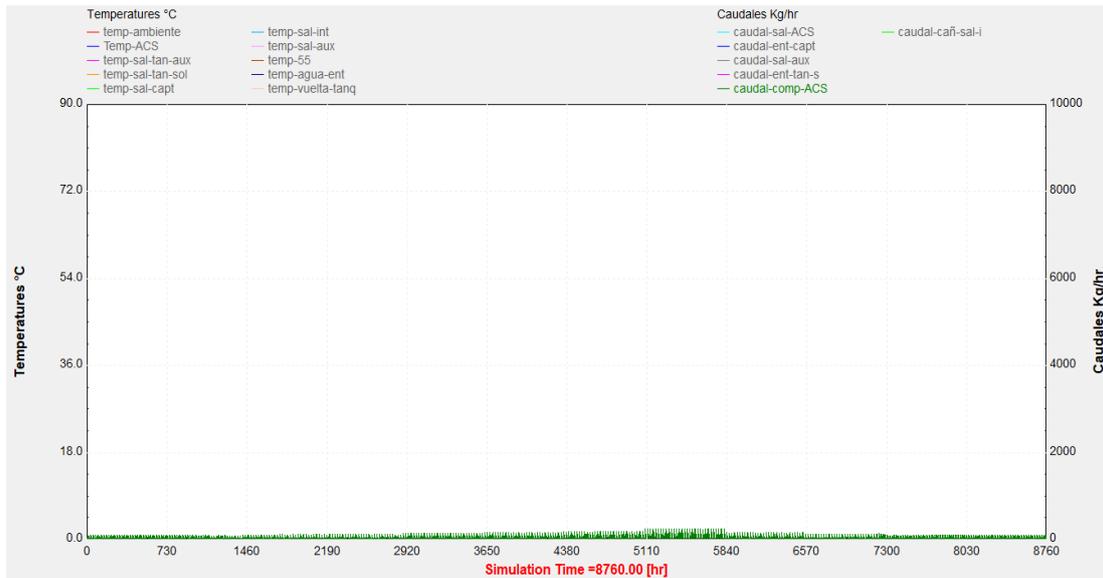


Figura 3-46 Caudal de compensación de agua fría que sale de la Tee tempering valve

A continuación, se estudiarán en 4 días del año las gráficas combinadas, siguiendo el orden cronológico del día en el año. Para que sean entendibles se verá progresivamente como se van añadiendo variables graficadas:

- Evaluación del día 4 de enero:

Evaluación de las temperaturas (Figura 3-47):

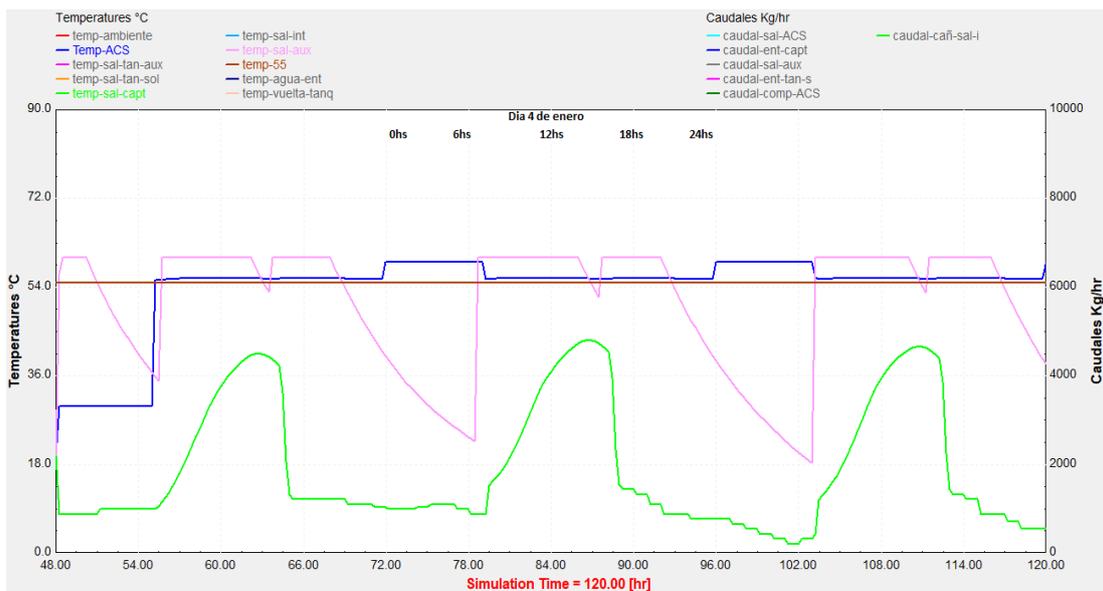


Figura 3-47 Evolución de las temperaturas del sistema el día 4 de enero

Vemos en esta grafica que precisamente como era de esperar, los niveles de radiación no son suficientes para conseguir calentar el agua a la temperatura de consigna de 55°C. Por esto trabaja el auxiliar para compensar esta falta de temperatura propia del sistema primario. Dada la correcta configuración del sistema se mantiene la temperatura de consigna.

Evaluación de los caudales (Figura 3-48):

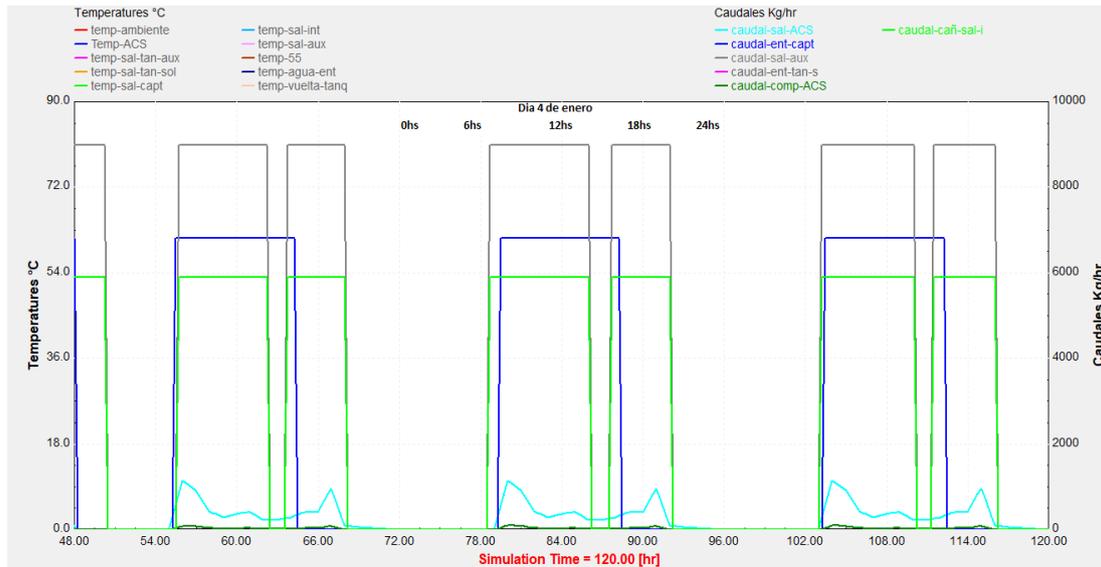


Figura 3-48 Evolución de los caudales del sistema el día 4 de enero

En cuanto a los caudales podemos ver que tanto el sistema primario como el secundario empiezan a activar las bombas cuando hay demanda de ACS. Por la configuración del sistema las bombas del sistema secundario se activan en el mismo momento. En cuanto al sistema primario solo se activa en momentos donde la radiación incidente le permite aportar calor en el sistema, por esto antes de las 18 h el sistema primario se desactiva. Solo se dispone del sistema secundario para el aporte del calor necesario para poder calentar el agua en los momentos de demanda.

En la figura 3-49 se muestran ambas graficas integradas, De esta grafica podemos analizar que, dada la inercia del sistema debido a la presencia de los tanques en ambos sistemas y el alto valor de temperatura alcanzada por la operación del sistema primario, es que el sistema secundario puede desactivar sus bombas.

Además, cabe resaltar que hay un aumento de la temperatura del ACS para los momentos donde no hay demanda de ACS, que para este perfil de consumo es aproximadamente desde las 24 horas de un día a las 8 primeras horas del día siguiente.

Simulación dinámica y evaluación de una instalación de energía solar térmica para producción de agua caliente sanitaria en un hotel

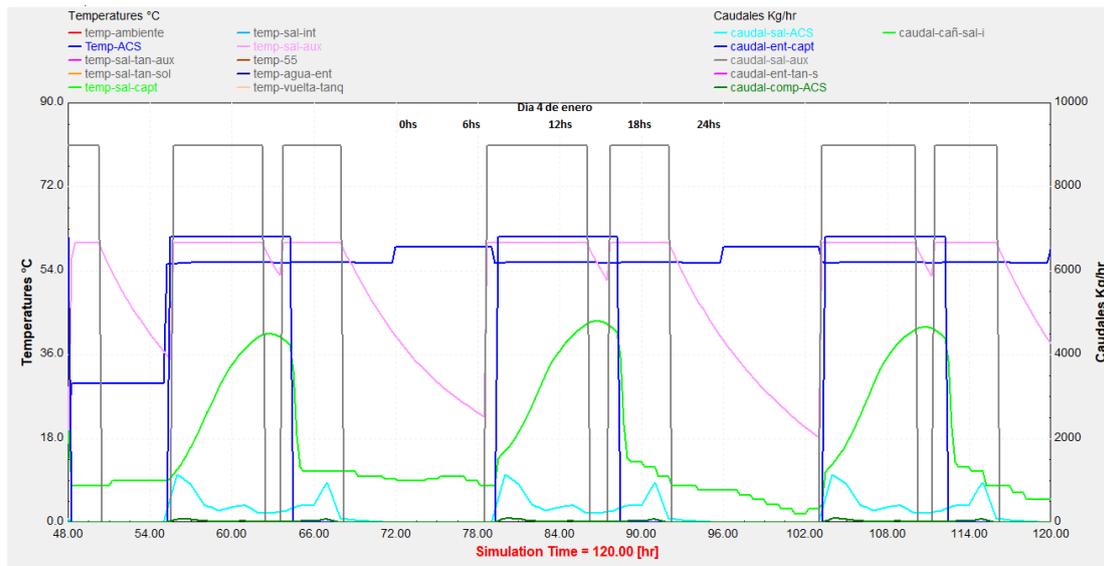


Figura 3-49 Integración de caudales y temperaturas evaluadas para el día 4 de enero

- Día de 10 de abril:

Evaluación de las temperaturas (Figura 3-50):

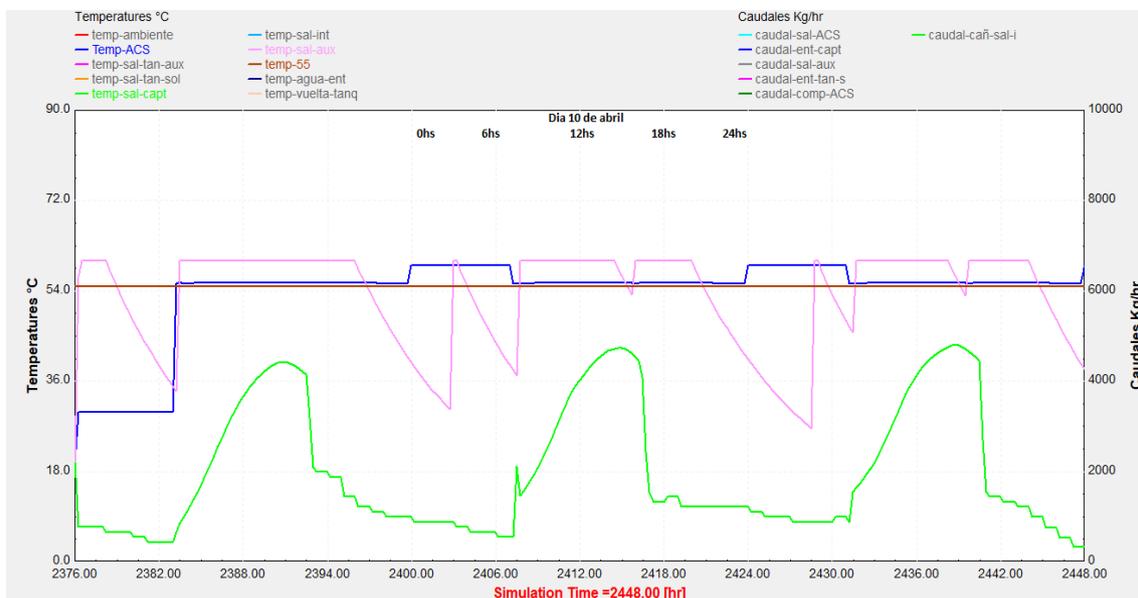


Figura 3-50 Evolución de las temperaturas del sistema para el día 10 de abril

Evaluación de los caudales (Figura 3-51):

Si bien se observa que se repiten patrones similares a los del día 4 de enero, hay una diferencia que se encuentra donde el sistema sin consumo puede activar el auxiliar para mantener la temperatura del tanque en un

valor alto lo que permite mejorar la inercia del sistema. Posteriormente si se pone en funcionamiento el sistema, cuenta con la inercia suficiente para afrontar la demanda abrupta de las primeras horas de la mañana.

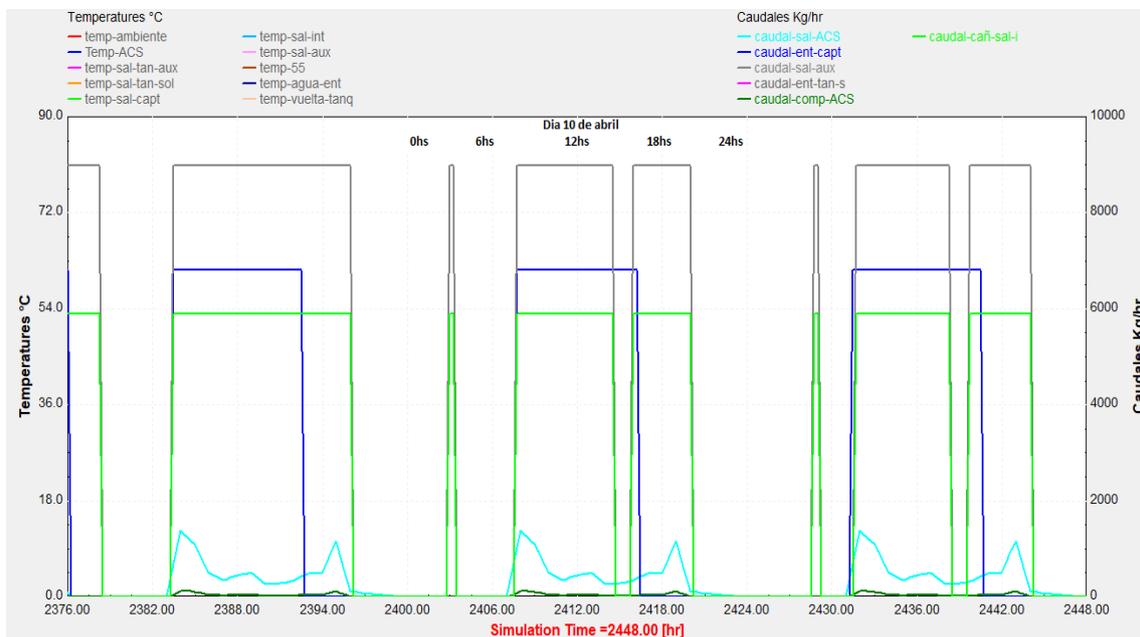


Figura 3-51 Evolución de los caudales del sistema para el día 10 de abril

Ambas graficas integradas (Figura 3-52):

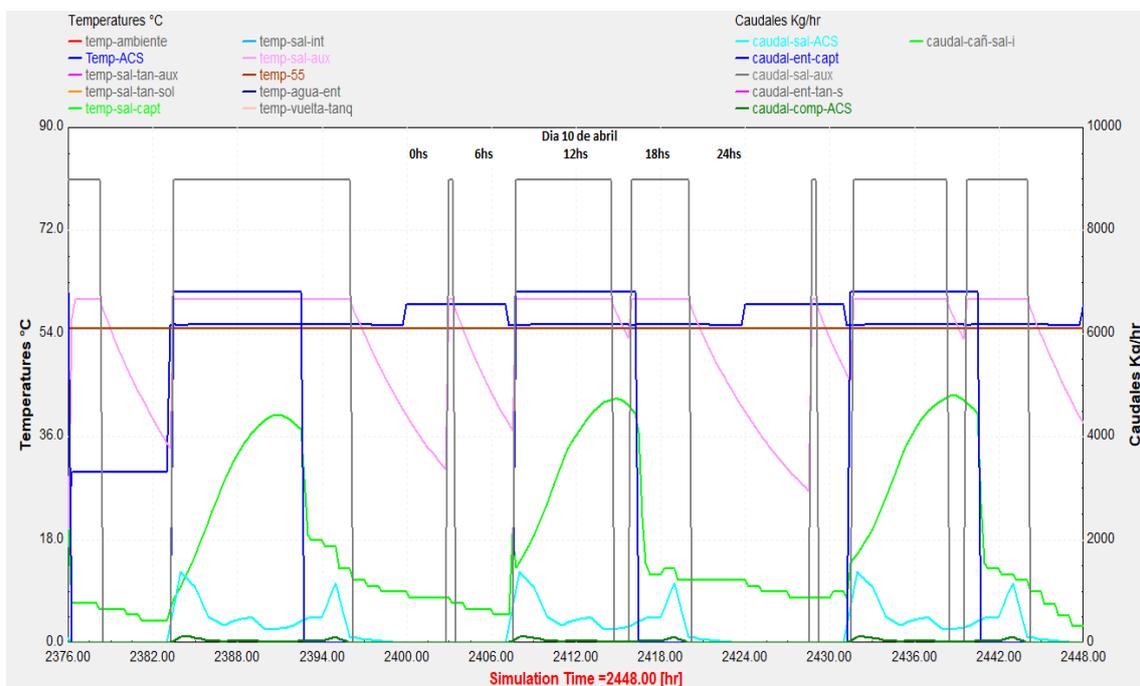


Figura 3-52 Integración de caudales y temperaturas evaluadas para el día 10 de abril

- Día de 11 de julio:

Evaluación de temperaturas (Figura 3-53):

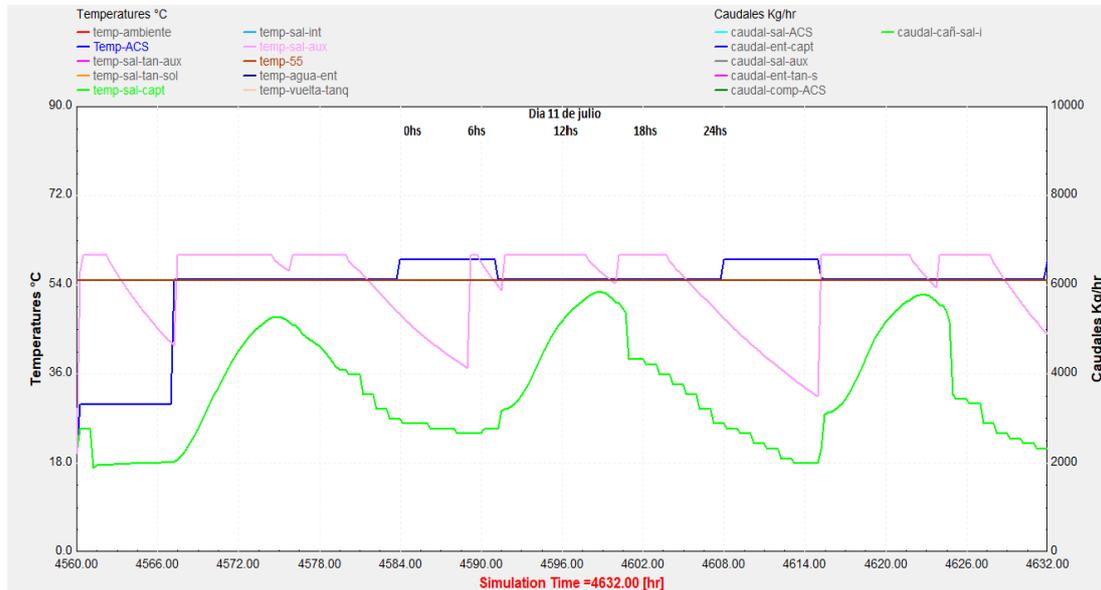


Figura 3-53 Evolución de las temperaturas del sistema para el día 11 de julio

Como se puede apreciar, ya para esta época del año los valores de radiación son altos lo que permite que las temperaturas alcanzadas en el sistema primario sean altas. Esto se verá en la siguiente figura como un aumento del tiempo de parada de las bombas del sistema secundario.

Evaluación de los caudales (Figura 3-54):

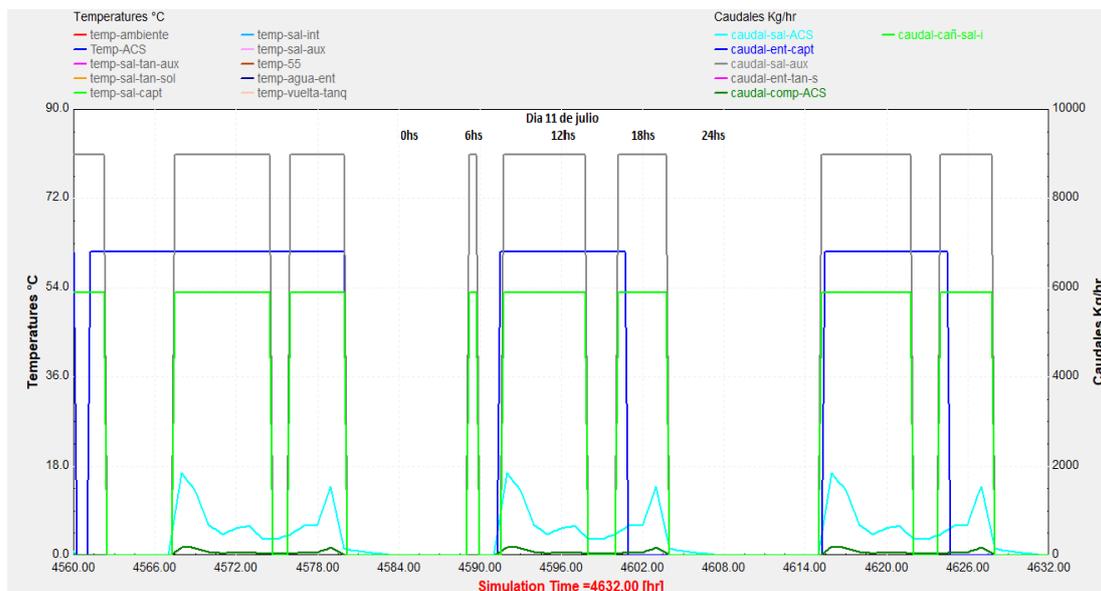


Figura 3-54 Evolución de los caudales del sistema para el día 11 de julio

Es visible resaltar que los caudales de demanda y compensación son más altos para esta época del año que en los días anteriormente evaluados.

Ambas graficas integradas (véase la figura 3-55):

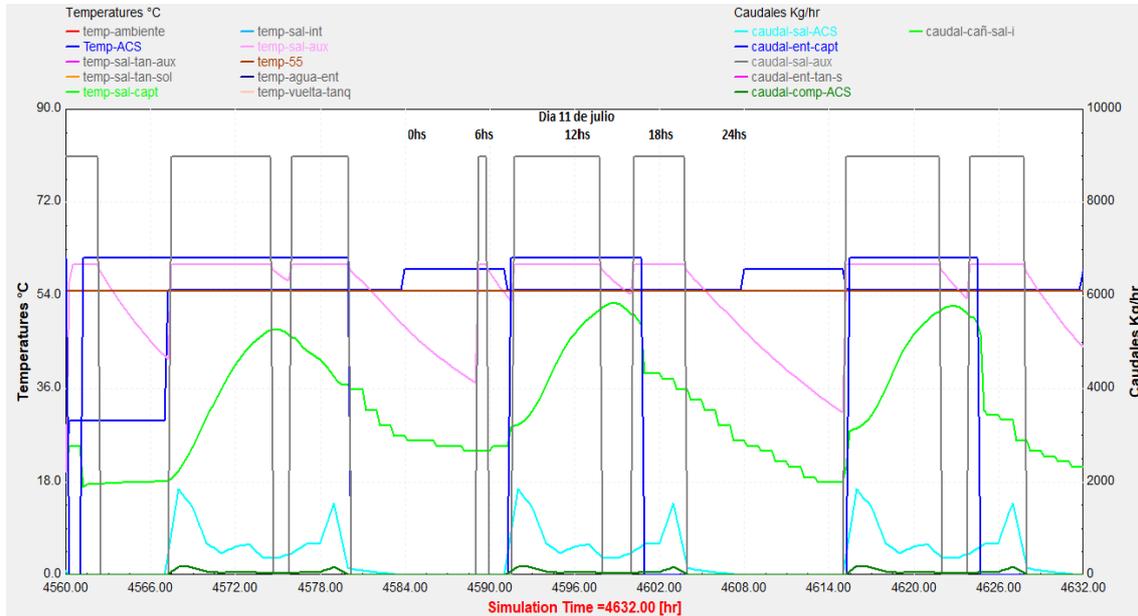


Figura 3-55 Integración de caudales y temperaturas evaluadas para el día 11 de julio

- Día 16 de octubre:

Evaluación de temperaturas (Figura 3-56):

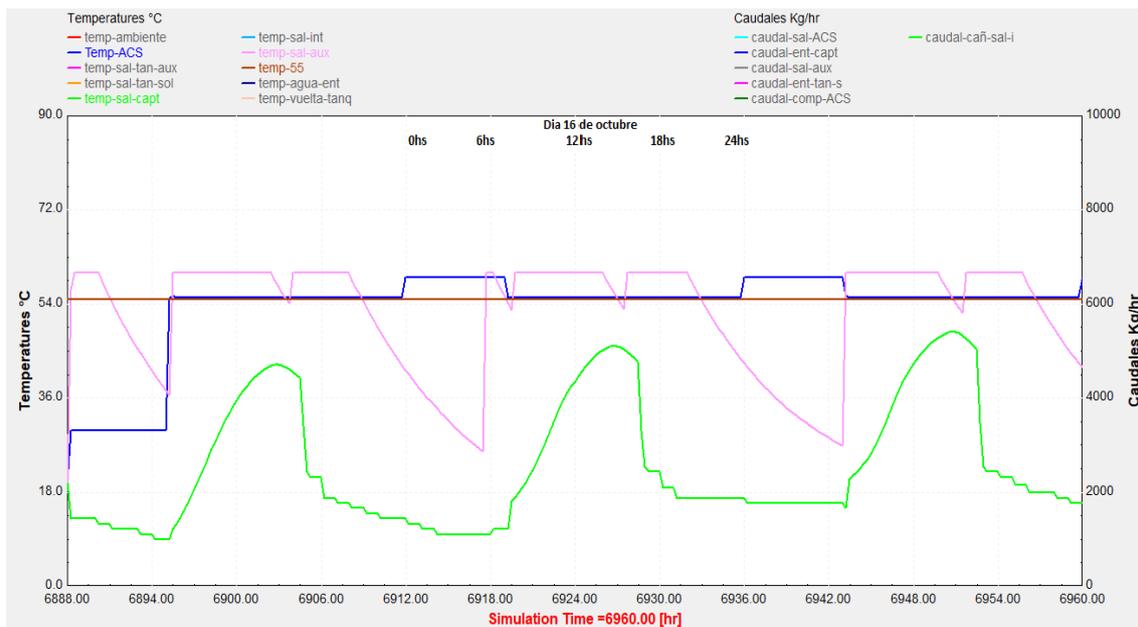


Figura 3-56 Evolución de las temperaturas del sistema para el día 16 de octubre

Evaluación de caudales (véase la figura 3-57):

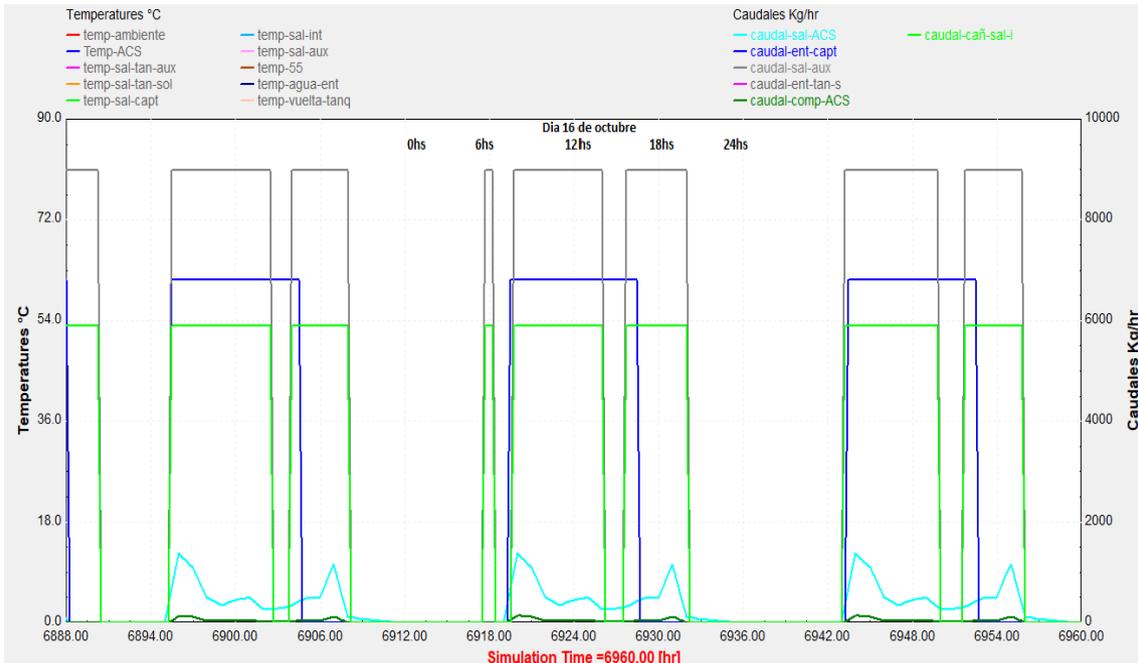


Figura 3-57 Evolución de los caudales del sistema para el día 16 de octubre

Tanto los valores de temperatura como los valores de caudales para este día tienen un comportamiento similar a los del día 10 de abril, como era de esperarse.

Ambas graficas integradas (Figura 3-58):

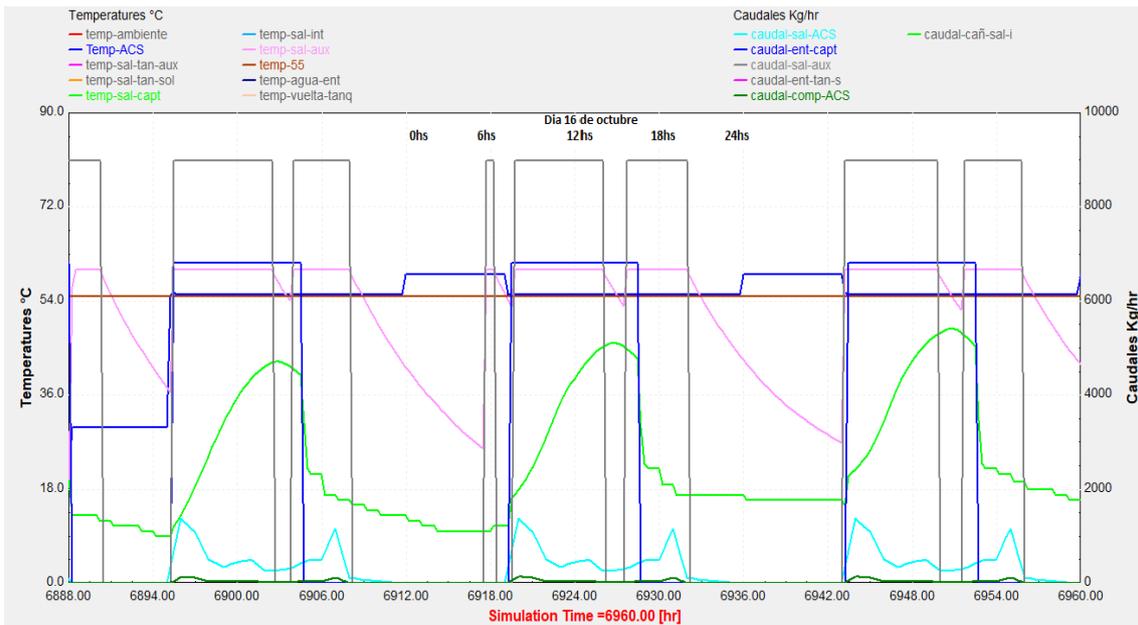


Figura 3-58 Integración de caudales y temperaturas evaluadas para el día 16 de octubre

3.9 Evaluación de la evolución temporal de f

Ya en este punto se puede evaluar la evolución de f % al cabo de un año, junto con los valores de calores intercambiados presentes en el captador solar y el auxiliar. Su grafica se presenta en la figura 3-59:

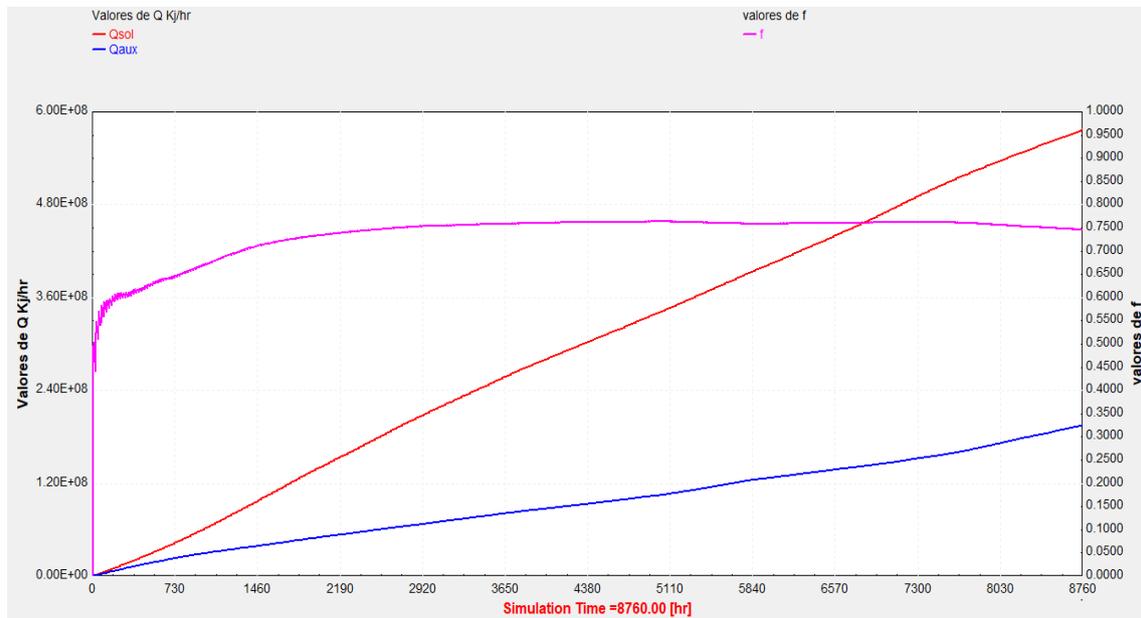


Figura 3-59 Evolución de f %, de la energía solar captada y del sistema auxiliar

Podemos evaluar que el calor que aporta el sistema primario proveniente de la energía de radiación del sol en valores acumulados es siempre mayor que el valor acumulado de calor del auxiliar lo que permite tener un alto valor de f. El acumulado es del 74,7 %.

En cuanto a los valores alcanzados de f en la Figura 3-59 se comprueba que f siempre tiende a aumentar en el año a medida que la radiación aumenta. En el momento que f empieza a decrecer se debe a la disminución de la radiación captada, por lo que en la mitad del año se alcanza el máximo de 76,5 % y luego disminuye hasta llegar a un 74,4 % al finalizar el año.

3.10 Evaluación del caso base

Un análisis y evaluación detenido de este conjunto de curvas obtenidas mediante TRNSYS permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- A. En cuanto al perfil de consumo diario utilizado en el presente proyecto cabe destacar que se tomó un perfil promedio de uso de un hotel de ubicación costera. Diferentes resultados podrían obtenerse al variar este perfil de consumo, en el caso de que uso del agua en el hotel tendiera a ser en

- horarios donde no hay radiación incidente apreciable, se generaría entonces un consumo mayor del auxiliar lo que disminuiría el valor de f .
- B. Que el sistema auxiliar puede no intervenir para proporcionar calor en determinados momentos en el día, esto se debe al aporte de calor del sistema primario y a la inercia propia del sistema por sus tanques de acumulación mayoritariamente.
 - C. Que el sistema auxiliar funcionara todos los días, en mayor o menor medida dependiendo del aporte de calor que proporcione el sistema primario. Esto es así ya que en ningún día del año la inercia del sistema y el calor que provee el sistema primario alcanzan para cubrir las exigencias del perfil de consumo de ACS, dado que hay un consumo importante en horarios donde ya no se dispone de buena radiación solar.
 - D. Que puede tenerse la posibilidad que se generen picos de temperatura en los captadores solares en los momentos que no funciona la bomba del primario y haya radiación suficiente pero no sea necesario el aporte de los captadores solares porque con la inercia del sistema puede alcanzarse la temperatura de consigna. Se verifica el correcto funcionamiento del primario al evaluar las temperaturas a la salida del tanque primario (Figura 3-40) donde no se supera la temperatura de 60°C .
 - E. Que la Figura 3-42 es una de las gráficas más importantes de toda la simulación ya que muestra que se esté alcanzando a la salida del sistema completo la temperatura de consigna del ACS para todo el edificio. Se ve claramente que en esta grafica siempre se está en el valor mínimo en la temperatura de consigna para los momentos de demanda de ACS, y que los valores máximos, donde se está por encima de este valor y llegando a los 60°C aproximadamente, se debe a que en esos momentos no hay consumo y el agua tiende a la temperatura del sistema auxiliar.
 - F. En cuanto a los caudales propios de los sistemas, son valores de caudales muy superiores a los de la demanda de ACS. Esto es así porque el sistema debe reaccionar de forma inmediata para consumos casi instantáneos y abruptos de ACS; garantizando no estar por debajo de la temperatura de consigna a la salida de todo el sistema. También es importante aclarar que estos caudales son para circuitos cerrados a diferencia del caudal de ACS que circula en un circuito abierto.
 - G. Una correcta configuración del sistema se verifica si es que la demanda de caudal de compensación (agua fría) no alcanza valores muy altos en comparación con los caudales de ACS erogados. Esto se verifica al comparar las Figuras 3-20 y 3-46. Es de esperar que el caudal de compensación de valor más alto se encuentre en los meses de mayor radiación solar, por lo que el sistema primario este dando como salida agua a una temperatura más alta a la de consigna.

- H. Como norma para la evaluación de los perfiles diarios se puede decir que en el punto de mayor temperatura del sistema primario puede ser el momento en que se desactiva el sistema auxiliar. En cuanto al tiempo de entrada y salida del auxiliar dependerá de la condición de cada día, los días de verano se tendrá menor entrada del auxiliar y los días de menor radiación solar entra el sistema auxiliar a funcionar.
- I. Si bien los perfiles de todos los días parecen similares a simple vista hay que evaluar que los valores de temperaturas alcanzados en cada punto del día y los lapsos de tiempo de operación en el eje de abscisas de cada Figura, ya que estos difieren.
- J. En cuanto a los perfiles evaluados para los días 4 de enero y 10 de abril se observa una similitud importante en cuanto a caudales y temperaturas. Esto se entiende por qué las condiciones exteriores no difieren lo suficiente como para lograr menores tiempos de operación del auxiliar como podría suponerse para el día 10 de abril.

3.11 Análisis paramétrico

A continuación, se realizará el análisis paramétrico que incluye ir variando parámetros del sistema para ver los valores de f (fracción de cobertura solar) obtenidos. Dentro de las variables a modificar tendremos:

- La superficie de captación
- Volumen de acumulación en el circuito solar
- Orientación de los captadores solares
- Inclinación de los captadores solares
- Aumentar la cantidad de ocupantes en el hotel por mes

La superficie de captación:

Se modificará el área de captación desde 50 m² hasta 250 m². Esto permitirá evaluar hasta qué punto es viable aumentar la superficie de captación en función del aumento del valor de f . Lo que se verifica en el siguiente gráfico es que a partir de los 140 m² de área de captación no se verifica un gran aumento proporcional del valor de f , con lo que ya no tiene sentido seguir aumentando el área de captación dado que no es económicamente viable frente a la ganancia obtenida. (Figura 3-60)

El RITE establece una limitación para el área total de captadores solares admisible. Para esto se deberá cumplir:

$$1,25 \leq 100 * A/Mv \leq 2$$

Siendo:

- A: Área total de captación
- n: Número de captadores solares
- Ai: Área de cada colector de 2,13 m²
- Mv: Consumo medio diario de los meses de verano de ACS en litros/día.

Obteniendo un valor promedio de 12.527 l/d

Considerando: $A=A_i \cdot n$

Esto hace que para este caso: $156,59 \text{ m}^2 \leq A \leq 250,54 \text{ m}^2$

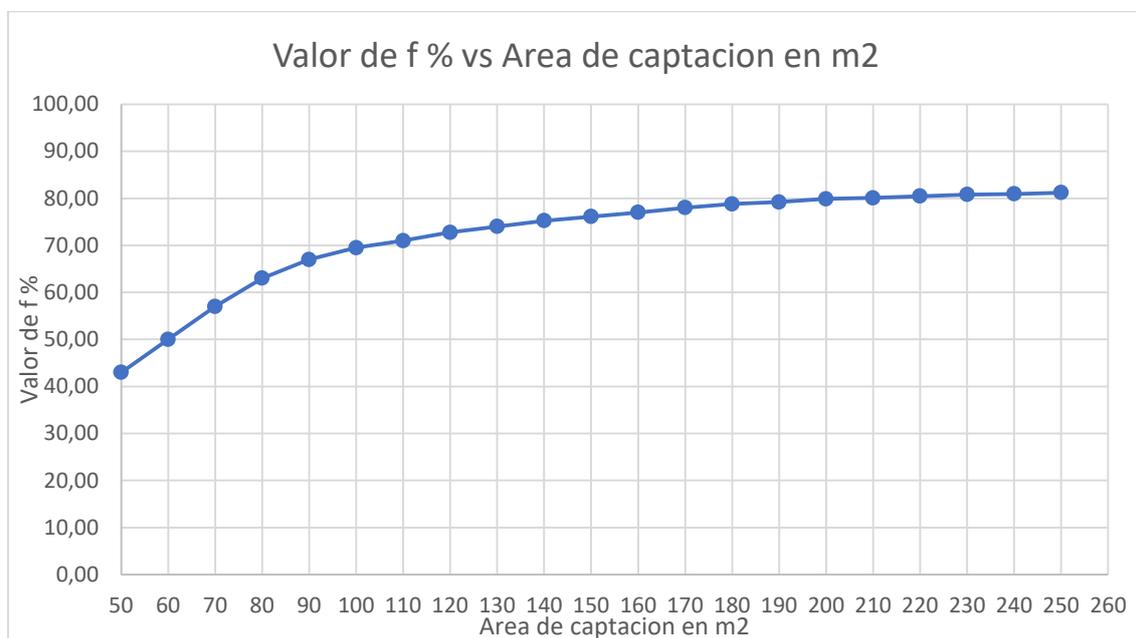


Figura 3-60 Valor de f % en función de la superficie de captación en m²

Pero en este caso tomaremos un área menor dado que el área habilitada física para poder hacer la instalación permite tener no más de 137 m² para el área de captación. Por lo que se dispondrán de 64 captadores solares que es el máximo físico posible. (Paez Rodriguez, 2001)

Volumen de captación del circuito solar:

En cuanto al volumen de captación del sistema primario podemos ver que a medida que se aumente dicho volumen se mejora la inercia del sistema lo que genera que el valor de f % aumente. Pero cabe resaltar que este aumento no es muy significativo en valores porcentuales como veremos a continuación (Figura 3-61).

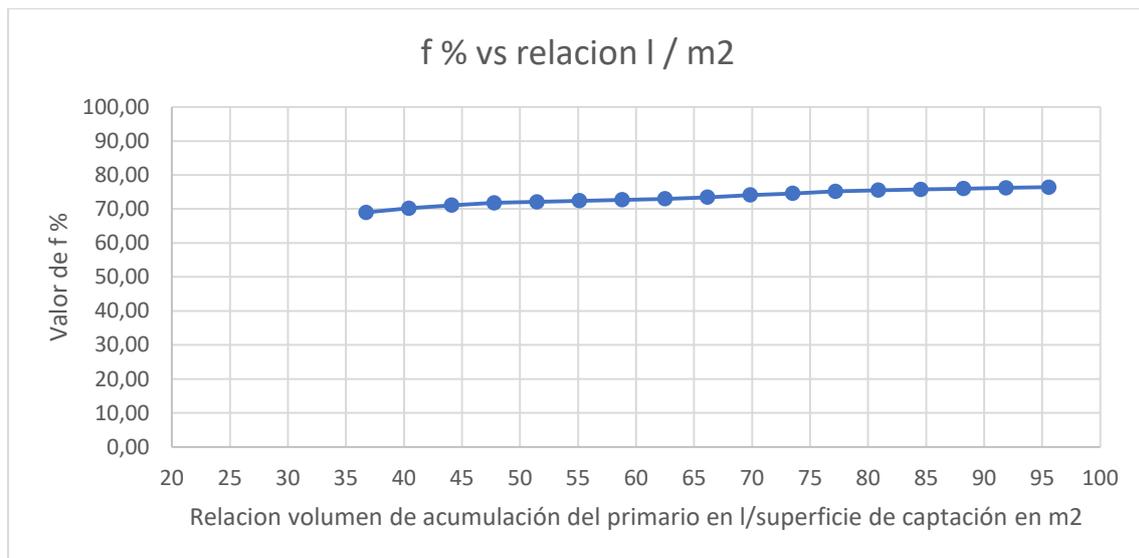


Figura 3-61 Valor de f % en función de la relación volumen acumulación / superficie captación

Por estos resultados y lo expuesto anteriormente es que debemos guiarnos por lo que establece la norma del RITE para ver dentro de que límites podemos escoger el volumen del sistema de acumulación conveniente. Según el RITE se debe cumplir: $0,8 * Mv \leq V \leq Mv$

Siendo:

V: El volumen de acumulación en litros

Mv: consumo medio diario de los meses de verano de ACS en litros/día.

Obteniendo un valor promedio de 12.527 l/d

Por lo que para nuestro Mv: $10021,6 \text{ l} \leq V \leq 12527 \text{ l}$

En este caso se toman 3 tanques de 3.500 l lo que hace un total de 10-500 l como volumen de acumulación total. (Paez Rodriguez, 2001)

Orientación de los captadores solares:

La orientación de los captadores es un factor que desde un principio puede establecerse tratando que los captadores solares reciban radiación el mayor tiempo posible y los valores más altos de radiación. Se deberán orientar hacia el sol en los momentos del día de mayor radiación como primera aproximación.

Esta orientación estará claramente condicionada por el lugar geográfico donde nos encontremos, dada la ubicación geográfica de esta simulación se puede presuponer que la mejor orientación estará hacia el sur-este..

Con estas consideraciones se puede entonces establecer los valores de TRNSYS de f % en función de la orientación (Figura 3-64):

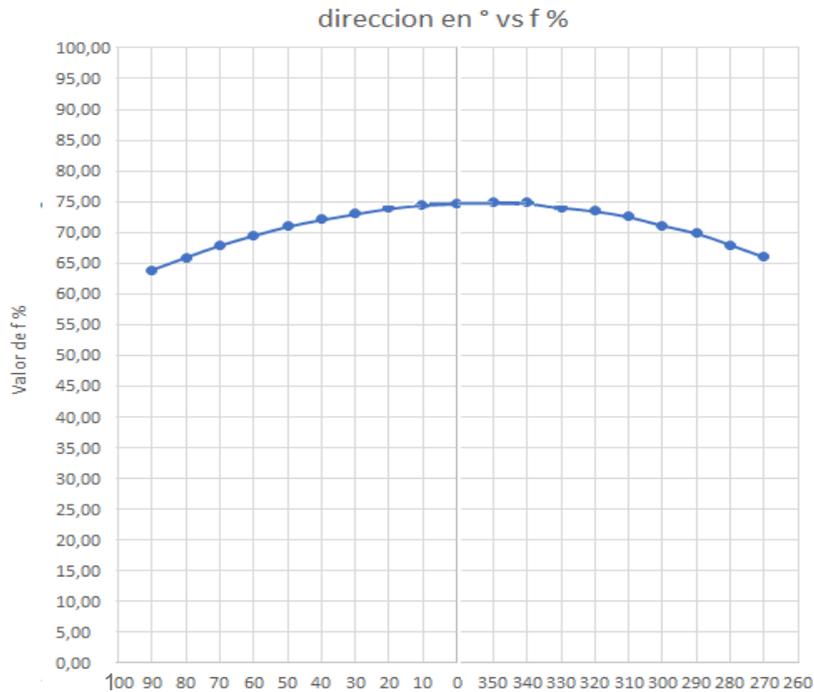


Figura 3-64 Valor de f en función de la orientación de los captadores

Conociendo los valores obtenidos en TRNSYS hay que resaltar que el RITE establece que debe orientarse en el entorno de 25° al sur-oeste como un límite hacia el oeste y otro límite de 25° al sur-este como límite al sur-este. Esto hace que deba orientarse los captadores en sistema que opta TRNSYS como sistema de referencia, para el arco conformado entre los 25° moviéndonos en sentido antihorario hasta los 335° .

En este caso en particular vemos que los valores máximos de f se alcanzan en los entornos de 350° , por lo que para nuestro proyecto tomaremos una orientación de los captadores solares de 345° .

Inclinación de la superficie de captadores solares:

En este apartado evaluaremos con qué inclinación debe colocarse el captador haciendo un ángulo con la horizontal, siendo este ángulo 0° en caso de que el captador se encuentre paralelo al suelo y 90° para el caso en que el captador se encuentra perpendicular al suelo. A primera vista se puede interpretar que se deberá dar una inclinación tal que permita estar lo más perpendicular posible a la incidencia de los rayos del sol, pero saber qué valor adecuado de grados de inclinación es lo que obtendremos a continuación.

Tomando como referencia el párrafo del apartado anterior: “Una consideración que debe hacerse es establecer el sistema de orientación que se utilizará, porque se establecerá el sistema que utiliza TRNSYS para establecer la orientación en su fichero de procesador meteorológico (TYPE16c) en el apartado de los input. Aclaremos que este es el fichero a modificar porque este luego genera una salida que modifica al fichero del captador solar (Type1b). A continuación, veremos lo que nos indica dicho fichero TYPE16c en cuanto a la variable azimuth of surface:” se hará un el mismo procedimiento, pero en este caso será con la inclinación del captador que para TRNSYS es slope of surface.(Figura 3-65).

Según el RITE se establece que la inclinación debe ir desde los 26,5° hasta los 46,5° como intervalo. Observando por lo obtenido en la gráfica anterior es que lo más conveniente es situar los captadores a 45° generando así que se obtenga el mayor valor de f %. (Paez Rodriguez, 2001)

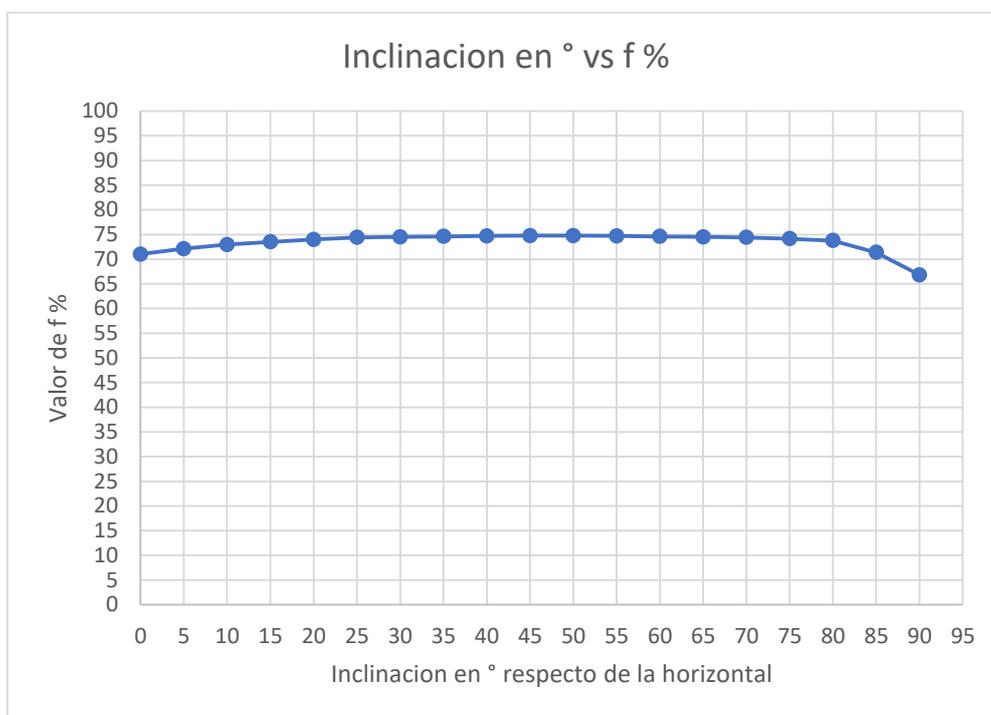


Figura 3-65 Valor de f % en función de la inclinación en ° respecto de la horizontal

Aumento de ocupantes en el edificio:

Consideremos que como el edificio es un hotel que puede tener cambios en sus condiciones que generen que el edificio aumente la ocupación a cada mes del año en la misma cantidad. Lo que se puede esperar es que el sistema este desadaptado a las necesidades del edificio por lo que se espera una disminución del valor de f %, que se pueden deber a que los parámetros de diseño hacen que sea insuficiente la contribución de cada elemento del sistema. A continuación, veremos cómo evoluciona el sistema (Figura 3-66).

Vemos entonces que el sistema es sensible a un aumento de ocupantes, cabe resaltar también que se ha hecho una evaluación con un aumento de ocupantes muy importantes. Es por esto que, en caso de aumentar la cantidad de ocupantes por encima de 60, se debería plantear reestructurar y reconfigurar el sistema para permitir una adecuación que asemeje los valores obtenidos de f % al valor del caso base.

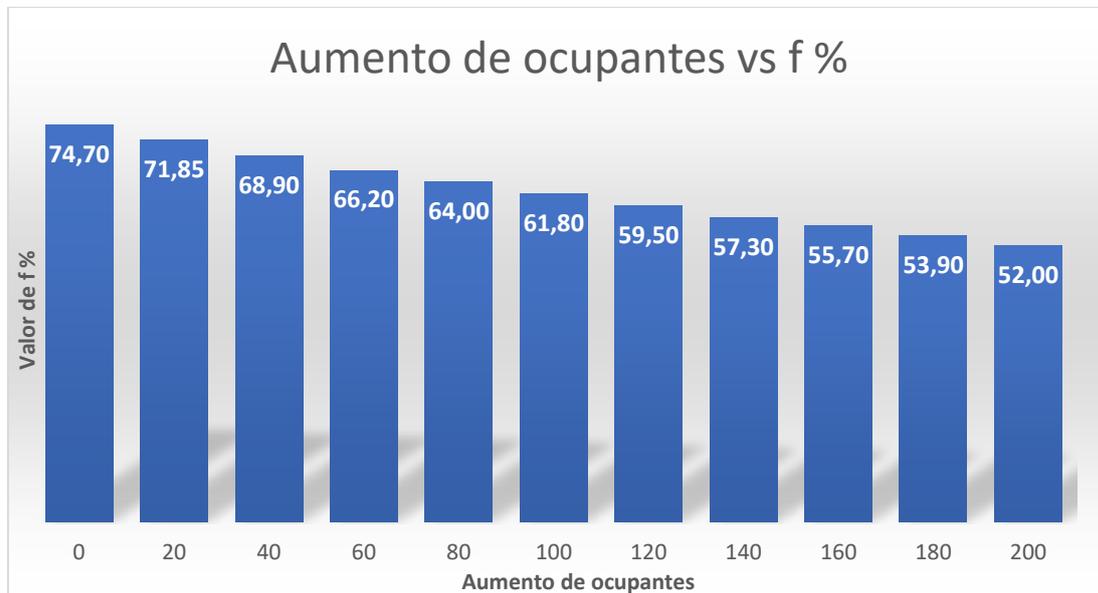


Figura 3-66 Valor de f % en función del Aumento de ocupantes

Valores de variables obtenidos definitivos del caso base y el valor de f %:

Evaluaremos cuales son los parámetros seleccionados para el caso base (Figura 3-67). Con las variables establecidas se obtiene el valor de f siguiente (Figura 3-68):

Características del caso base del sistema	Cantidad	Unidades
Área del captador	136	m ²
volumen de acumulación del primario	10.500	l
Orientación de los captadores	345	° (sur-este)
Inclinación de los captadores	45	°
Aumento de cantidad de ocupantes	0	

Figura 3-67 Tabla de características del caso base

Valor de f obtenido con el caso base	74,40%
--	--------

Figura 3-68 Valor de f % del caso base

3.12 Resultados del análisis paramétrico

Haremos entonces una lista de conclusiones referidos a las gráficas obtenidas:

A. En cuanto a la influencia del área de captación en el valor de f %, un análisis grafico permite establecer tres zonas en la Figura 3-60:

- i. La primer zona desde los 50 m² hasta los 90 m², en la cual se detecta el mayor incremento de f % con el aumento de la superficie de captacion. Donde cada 10 m² cuadrados de incremento se obtiene un aumento de f del 6% en promedio.
- ii. La segunda zona va desde los 90 m² hasta los 180 m², se puede determinar como una zona de incremento intermedio de f % con el aumento de la superficie de captacion. Donde cada 10 m² cuadrados de incremento se obtiene un aumento de f del 1,31% en promedio.
- iii. La tercera zona va desde los 180 m² hasta los 250 m², se puede determinar como una zona de incremento bajo de f % con el aumento de la superficie de captacion. Donde cada 10 m² cuadrados de incremento se obtiene un aumento de f del 0,34% en promedio.

Esto quiere decir que inicialmente no es conveniente ubicarse en la tercera zona, por lo que la ubicación del presente proyecto se concreta en la zona intermedia dadas las limitaciones es físicas de la instalación como se destacó anteriormente.

B. Refiriéndonos a la influencia del volumen del tanque de acumulación del sistema de captación solar, podemos decir que la variación del aumento de volumen no es sensible de manera considerable en el sistema ya que se evalúa una variación desde los 5000 l hasta los 13000 l y solo se modifica f % desde el 69 % hasta el 76,4 %. Esto quiere decir que en promedio cada 500 l de aumento de volumen del tanque de acumulación representa un 0,46 % de f .

C. Para el caso de la orientación de los captadores solares se puede establecer que para la Figura 3-64 se encuentran 3 zonas a evaluar:

- i. La primera zona va desde los 90° hasta los 10°, donde cada 10° de variación de orientación se aumenta en promedio 1,43 % de f . En este intervalo f varía desde el 63,9 % hasta el 73,93 %.
- ii. La segunda zona va desde los 10° hasta los 320°, donde cada 10° de variación de orientación se varia en promedio 0,4 % de f . En este

intervalo f varía aumentando desde el 73,93% hasta el 74,9 % y luego disminuyendo hasta 73,5 %.

- iii. La primera zona va desde los 90° hasta los 10° , donde cada 10° de variación de orientación se disminuye en promedio 1,5 % de f . En este intervalo f varía desde el 73,5 % hasta el 66 %.

En el presente proyecto Los captadores solares se ubican con orientación de la segunda zona. El variar la orientación de estos captadores no insumen una suma de dinero como costo. Por lo que puede orientarse para lograr obtener el mayor valor f %.

- D. En la Figura 3-65 se presenta la variación de f % con respecto a la inclinación respecto de la horizontal, y como primera afirmación se puede establecer que la inclinación en este caso no influye sensiblemente. En un rango amplio de inclinaciones se obtiene un buen valor de f %, ya que desde los 0° (horizontal) hasta los 45° se obtiene desde 71 % hasta el 74,75 % en el valor de f , y luego desde los 45° hasta los 85° se va desde los 74,75 % hasta 71,35 %. En el punto de inclinación de 90° (vertical), el valor de f % es de 66,8 % por lo que es una situación distinta a las demás inclinaciones y la disminución en 5° es grande; para interpretar esto debe aclararse que la ubicación del proyecto está muy cercana a la línea por donde pasa el sol, por lo que puede entenderse que no hay buen ángulo de captación de la radiación solar.
- E. En cuanto al aumento de ocupantes en todos los meses del año en la misma cantidad, se puede establecer que cada 20 ocupantes de aumento se obtendrá una disminución de f % en promedio de 2,27 %. Lo cual quiere decir que el sistema es sensible al aumento de ocupantes pudiendo ir desde el 74,4 % hasta los 52 % con un aumento desde 0 hasta los 200 ocupantes por mes en el hotel. Cabe destacar que el hotel inicialmente está proyectado que tendrá hasta 232 ocupantes en su época más concurrida, por lo que la evaluación de este ítem presupone un aumento sustancial en la cantidad de ocupantes.

4 Conclusiones

4.1 Introducción

En el este capítulo se resumen las conclusiones obtenidas tanto del proyecto en general como en particular del capítulo 3 donde se obtiene información de las variables evaluadas en tiempo real. Se analizan las gráficas para obtener las condiciones óptimas del sistema.

4.2 Resumen

Este tipo de proyecto en un trabajo de fin de master permite al autor la posibilidad de nutrirse de un aprendizaje muy importante para el desarrollo profesional. No solo desde el punto de vista de los resultados obtenidos, sino también desde el proceso en sí, que incluye muchos aspectos de la formación del profesional y la resolución de desafíos que se deben superar.

En el proyecto se identifica todos los parámetros y variables de entrada para la generación de ACS por medio de energía solar de un edificio del tipo hotel de 4 estrellas ubicado en la localidad de Los Barrios y se simula su comportamiento mediante el software TRNSYS. Este ofrece resultados fiables y con escaso error frente a los valores obtenidos de forma empírica.

Los resultados de la simulación en TRNSYS permiten un análisis paramétrico con el que se optimiza la elección de los parámetros:

- La superficie de captación
- Volumen de acumulación en el circuito solar
- Orientación de los captadores solares
- Inclinación de los captadores solares
- Aumentar la cantidad de ocupantes en el hotel por mes

Logrando optimizar estos parámetros se obtiene un valor de f % alto (valor viable) lo que permite tener el sistema más eficiente posible.

4.3 Proyectar en TRNSYS

El proyectar con un software como TRNSYS conlleva un tiempo de aprendizaje que, una vez superado, permite obtener resultados muy satisfactorios.

Este proyecto contempla una etapa de incurrir en la simulación, que de manera empírica se va configurando los ficheros para obtener un comportamiento lógico de cada fichero, luego de configurado cada fichero se evalúa la configuración del conjunto de ficheros conformando un sistema.

Cuando ya todos los ficheros y sistemas están correctamente configurados el software ofrece mucha flexibilidad y rapidez para la variación de alguna variable. La configuración en si es un proceso que requiere de muchos datos de entrada y la correcta selección de los ficheros que mejor simulan la operación del sistema completo. Una condición de TRNSYS a destacar es que este software presenta una interfaz muy intuitiva y consta de mucha información para cada fichero.

Se debe considerar que para realizar este tipo de proyectos se necesita disponer de datos de la ubicación donde se realizara el proyecto. Uno de los ficheros esenciales es el fichero TYPE9e que funciona como un fichero meteorológico que provee datos relativos a factores exteriores al sistema como se detalla en este trabajo. Sin este fichero no hay punto de partida para trabajar en la simulación.

4.4 Conclusiones

Teniendo en cuenta lo establecido en los apartados 3.10 y 3.12 se hará un resumen de los aspectos más importantes.

El sistema primario es totalmente dependiente de del sistema auxiliar, es decir que no se puede proyectar una instalación que utilice energía solar únicamente. La compensación de con agua fría es necesaria en caso de necesitar erogar a la salida del sistema siempre a la temperatura de consigna.

Los perfiles de comportamiento de caudal y temperatura en cuanto a cada día, no representan gran variación, pero si en los valores del día de verano 11 de julio en comparación con los demás días evaluados.

Los factores que más influyen en el análisis paramétrico con respecto al valor de f % son:

- La superficie de captación
- Orientación de los captadores solares
- Aumentar la cantidad de ocupantes en el hotel por mes

Esto se debe o bien a que sus comportamientos son sensibles la variación de los factores, o bien por que no incluye un gran costo modificarlos y no se está obteniendo el mayor valor de f % por una incorrecta configuración.

Dentro de los parámetros que no influyen de manera sustancial para el valor de f % obtenido tenemos:

- Volumen de acumulación en el circuito solar
- Inclinación de los captadores solares

Esto se debe o bien a que sus comportamientos no son sensibles la variación de los factores, por lo que no es tan importante establecerlos de manera correcta en cuanto a la configuración para obtener un valor de f % alto.

5. Referencias

5.1. Referencias

- 1) AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. (2005). *Norma Española UNE 94002*. Madrid.
- 2) Guerra Macho, J. J. (2018). *01_Introducción a los sistemas de energía solar*. Sevilla.
- 3) Guerra Macho, J. J. (2018). *07_Edificación. Agua caliente y calefacción*. Sevilla.
- 4) Guerra Macho, J. J. (2018). *09_Métodos de diseño. Método f-Chart*. Sevilla.
- 5) J. A. Duffie y W. A. Beckman. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- 6) Paez Rodriguez, D. (2001). *Instalación de energía solar para la producción de agua caliente en un hotel*. Sevilla.
- 7) Pino, J., & Guerra Macho, J. J. (2020). *Descripción_TRNSYS*. Sevilla.
- 8) Resources, e.-M. (2019). *TRNSYS Transient Simulation tool*. Obtenido de <http://www.trnsys.com/>
- 9) sl, E. P. (diciembre de 2019). *Energía solar térmica*. Obtenido de <http://energiasplasencia.es/secciones-principales-2/energia-solar-termica-14>
- 10) Solar energy laboratory, TRANSOLAR, CSTB, TESS. (2004). *TRNSYS 16 Volume 2 Using the simulation studio*.
- 11) Solar-energía. (12 de Abril de 2019). *Energía solar.net*. Obtenido de <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/baja-temperatura>
- 12) TRNSYS 16. (s.f.). Apartado de información del TYPE.