

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y  
Mecatrónica

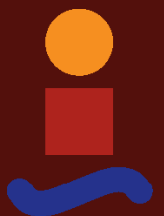
Modelado y simulación de una planta solar  
Fresnel de refrigeración

Autor: Luis González Parrilla

Tutor: Eduardo Fernández Camacho y Antonio Javier Gallego Len

**Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

# **Modelado y simulación de una planta solar Fresnel de refrigeración**

Autor:

Luis González Parrilla

Tutor:

Eduardo Fernández Camacho y Antonio Javier Gallego Len  
Catedrático de Universidad y Profesor Asociado

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado: Modelado y simulación de una planta solar Fresnel de refrigeración

Autor: Luis González Parrilla

Tutor: Eduardo Fernández Camacho y Antonio Javier Gallego Len

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

**D**ebo agradecerles a muchos familiares, compañeros y amigos la ayuda que me han prestado durante la realización de este Trabajo Fin de Grado, y especialmente a mis padres y mi hermano por su motivación, dedicación e infinita paciencia. Agradezco mucho a los profesores Antonio Javier Gallego Len y Eduardo Fernández Camacho por tutelar este trabajo, por su tiempo, su ayuda y sus buenos consejos.

*Luis González Parrilla*

*Sevilla, 2019*





# Resumen

---

Este Trabajo de Fin de Grado trata sobre el modelado y simulación de la planta de refrigeración solar ubicada en el techo del edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. La planta está compuesta por tres elementos principales: un campo de colectores solares de Fresnel, una máquina de absorción de doble efecto y un acumulador de energía.

El campo solar calienta el agua y es utilizada por la máquina de absorción para producir aire acondicionado para el edificio. Si la radiación solar disponible no es lo suficientemente alta como para alcanzar la temperatura adecuada para el enfriador de agua, el acumulador de energía se puede usar si está cargado.

Cada componente se describe con detalle en el trabajo. Se desarrolla y presenta un modelo matemático de los tres componentes y las tuberías que los conectan. Los modelos desarrollados tienen como objetivo obtener un comportamiento similar en comparación con los reales, y de este modo, tener una adecuada compensación entre complejidad y precisión. Los modelos muy complejos replican más exactamente el comportamiento de los sistemas reales al costo de aumentar dramáticamente la carga computacional. Dado que uno de los objetivos del desarrollo de este modelo es su utilización como un banco de pruebas para las estrategias de control, se debe descartar un modelo muy complejo.

Los modelos desarrollados en este trabajo se comparan con datos reales obtenidos de la planta real. También se proporcionan algunas simulaciones utilizando el modelo agregado de la planta de refrigeración solar.



# Abstract

---

**T**his Final Degree Project deals with the modeling and simulation of the solar cooling plant located at the roof of the Higher Technical School of Engineering of Seville building. The plant is composed by three main elements: a Fresnel Solar Collector Field, a double effect absorption machine and a storage tank.

The solar field heats up pressurized water used by the absorption machine to produce air conditioning for the building. If the solar radiation available is not high enough to reach the adequate temperature for the water chiller, the storage tank can be used if charged.

Every component is accurately described in the text. A mathematical model of the three components and the pipes connecting them is developed and presented.

The models developed here aim at obtaining a similar behaviour compared to the real ones. Thus an adequate trade-off between complexity and precision. Very complex models replicate more exactly the behaviour of the real systems at the cost of increasing dramatically the computational burden. Since one of the goals of the developing of this model is to be used as a test-bench for control strategies, a very complex model has to be ruled out.

The models developed in this work are compared to real data obtained from the real plant. Some simulations are also provided used the aggregate model of the solar cooling plant.



# Índice

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 La Planta de Refrigeración Solar de la ETSI	1
1.2 Breve descripción del funcionamiento de la Planta de Refrigeración Solar de la ETSI	3
1.3 Objetivos del Trabajo Fin de Grado	4
1.4 Estructura del Trabajo Fin de Grado	4
<b>2 Captadores Solares lineales de Fresnel</b>	<b>7</b>
2.1 Funcionamiento y Descripción	7
2.2 Diseño e Implementación	13
2.3 Modelado de una tubería	15
2.4 Simulación y Resultados	16
<b>3 Acumulador de Energía</b>	<b>23</b>
3.1 Funcionamiento	23
3.2 Descripción	25
3.3 Diseño e Implementación	27
3.4 Simulación y Resultados	29
3.4.1 Comportamiento de las masas dentro del acumulador de energía	29
3.4.2 Comportamiento de las temperaturas del bloque Captador + Tubería + Acumulador de Energía con datos reales	31
<b>4 Máquina de Absorción</b>	<b>35</b>
4.1 Funcionamiento y Descripción	35
4.2 Diseño e Implementación	40
4.2.1 Generador de Alta Temperatura	41
4.2.2 Evaporador	41
4.2.3 Refrigerador	42
4.3 Simulación y Resultados	43
4.3.1 Comportamiento individualizado de cada una de las componentes de la Máquina de Absorción	43
Generador de alta	44
Evaporador	45
Refrigerador	46

---

4.3.2	Comportamiento de las temperaturas del bloque Captador + Tubería + Máquina de Absorción con datos reales	47
<b>5</b>	<b>Planta de Refrigeración Solar</b>	<b>51</b>
5.1	Funcionamiento y descripción	51
5.1.1	Comportamiento de las temperaturas del montaje Captador-Acumulador en bucle	52
5.1.2	Comportamiento de las temperaturas del montaje Captador-Máquina de Absorción en bucle	53
5.2	Código comentado de la planta de refrigeración solar de el ETSI	57
5.3	Simulación de la PRS de la ETSI: Captador Solar de Fresnel, Acumulador de Energía y Máquina de Absorción	63
	<i>Conclusión</i>	67
	<i>Índice de Figuras</i>	69
	<i>Índice de Tablas</i>	71

# 1 Introducción

---

Es un hecho que la energía procedente de recursos fósiles (petróleo, carbón, gas natural y gas licuado del petróleo) es una energía no renovables y que tarde o temprano desaparecerá. Además esta energía polusiona en gran medida el medio ambiente. De ahí, la necesidad de buscar nuevo sistema de producción de energía y entre ellas, la proveniente de la radiación solar es muy importante, sobretodo por que es una energía inagotable, limpia y no polusiona.

Son muchos los trabajos de investigación en todos los niveles (universidad, empresa, gobierno,...) que justifican la necesidad de uso de este tipo de energía solar y, en mayor o menor medida, entran a valorar su gran importancia [?]. De esta forma, si es de interés para el lector de este trabajo, la justificación del por qué de la energía solar, le remito a la bibliografía donde compañeros antes han estudiado el estado del arte sobre este tipo de recurso energético [?, ?, ?, ?].

Por ello, se utilizará este capítulo para introducirnos directamente en la Planta de Refrigeración Solar (PRS) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) de la Universidad de Sevilla (US) [?].

## 1.1 La Planta de Refrigeración Solar de la ETSI

La Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla (ver Figura 1.1 izquierda) cuenta en la actualidad con cerca de 7.000 alumnos y 400 profesores. Su demanda energética en el año 2018



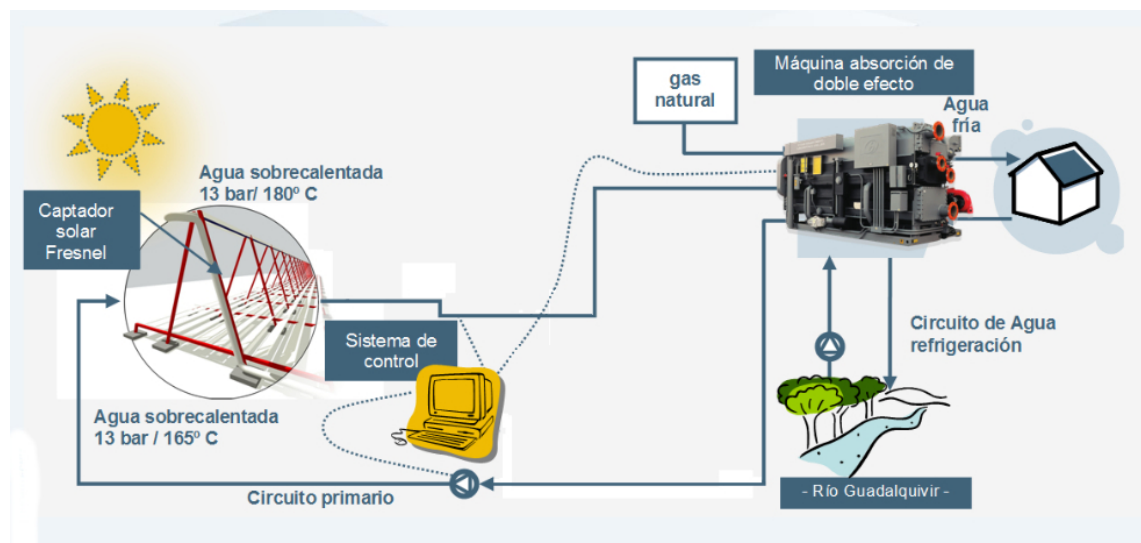
**Figura 1.1** Fachada del edificio principal de la ETSI de Sevilla (izquierda). Situación de los colectores solares en la azotea de uno de los edificios de la ETSI (derecha).

estuvo en torno al 1 MW [?] y ello evidencia su necesidad de uso de energía y mejor si es renovable. Por ello, doce años antes, en el año 2006, comenzó a desarrollarse la tecnología que presenta la

PRS a través de un proyecto de la “Corporación Tecnológica de Andalucía” (CTA), presentado por la compañía “Gas Natural” y con la participación de los grupos de investigación de Termotecnia y de Ingeniería de Sistemas de la ETSI de la Universidad de Sevilla. Así, en el año 2008, la compañía energética Gas Natural puso en marcha, con una inversión de 1.3 millones de euros, una instalación piloto de refrigeración solar en colaboración con la ETSI y con la financiación del 40 por ciento de la CTA. El sistema estuvo listo en 2009, fecha de finalización del proyecto en la que Gas Natural cedió la planta a la Universidad de Sevilla [?].

El objetivo principal de esta infraestructura, que en esas fechas era la primera en Europa con concentradores de Fresnel y una máquina de absorción de doble efecto, la cual permitía un mayor aprovechamiento de la energía solar para obtener frío apto para sistemas de climatización, fue la de disponer de una herramienta de estudio que permitiese establecer los parámetros técnicos, económicos y medioambientales del diseño de este tipo de instalaciones para el sector terciario, mediante un sistema de control y monitorización adecuado. Asimismo, se pretendía disponer de una instalación de referencia en el sector energético para demostrar la viabilidad técnica de estas aplicaciones.

De esta forma, uno de los edificios de la ETSI cuenta en su azotea (ver Figura 1.1 derecha) con  $352\text{ m}^2$  de concentradores lineales de Fresnel, que aprovechando la radiación solar, calientan un caudal de  $12\text{ m}^3/\text{h}$  de agua hasta una temperatura objetivo de  $180^\circ\text{C}$ . Si la temperatura excede de los  $190^\circ\text{C}$  todos los espejos son dirigidos hacia abajo por el sistema de control debido a razones de seguridad. El fluido caloportador es enviado a la máquina de absorción de doble efecto que tiene una capacidad nominal de  $174\text{ kW}$  con un Coeficiente de Rendimiento (COP) nominal de 1.34. Con esta PRS se busca cubrir el consumo de la ETSI en calefacción y refrigeración (ver Figura 1.2).



**Figura 1.2** Esquema general inicial de la PRS de la ETSI de Sevilla (año 2009).

Como dato muy interesante, señalar que durante un día de funcionamiento normal, la energía media diaria que es necesario aportar al generador de la máquina de absorción es de  $950\text{ kWh}$ . De los cuales, el 25% aproximadamente es aportado por una caldera de Gas Natural ( $250\text{ kWh}$ ) y el resto es aportado por los captadores solares ( $700\text{ kWh}$ ). De esta forma, la instalación de captadores solares permite que los  $700\text{ kWh}$  diarios no se produzcan en la caldera, evitándose la emisión a la atmósfera de unas 60 toneladas de  $\text{CO}_2$  al año.

El coste de los equipos rondó los 725 000 euros incluyendo los materiales y la instalación de éstos, siendo el elemento más costoso, el campo de captadores lineales de Fresnel, que superó los 300 000 euros. En este sentido la Secretaría General de Desarrollo Industrial y Energético de la



Junta de Andalucía en ese momento<sup>1</sup> indicó, en rueda de prensa, que este nuevo sistema abría “*unas perspectivas enormes*” al sector terciario para el uso de este tipo de tecnología que en principio “*supone unas inversiones más altas, pero que son amortizadas debido al ahorro que realizan*”. En esos años se señalaba, como ha ocurrido posteriormente, que el gasto en equipos se rebajarán en los próximos años ante la fabricación en serie de los dispositivos, ya que el PRS instalado en Sevilla es el primero de su categoría<sup>2</sup>, sólo comparable a la tecnología similar instalada en una planta en Israel y otra en Sabadell (Barcelona).

Con posterioridad a la implantación de la PRS de la ETSI, diferentes estudios concluyeron y luego fueron validados<sup>3</sup>, que los captadores solares de Fresnel son una tecnología fiable y segura; y sobretodo, que con condiciones de radiación favorables, parte de los espejos del captador solar se desenfocan del tubo receptor (desde el sistema de control) debido a que la máquina de absorción no es capaz de absorber toda la potencia térmica producida por el campo solar y ello planteó la necesidad de disponer de un sistema de almacenamiento. De esta forma, el esquema de la planta (ver Figura 1.3) paso a incorporar un tanque de acumulación de energía con un peso de más de 8 Tm lleno, con una capacidad de almacenamiento de 291 KWh y una potencia máxima de 150 KW.

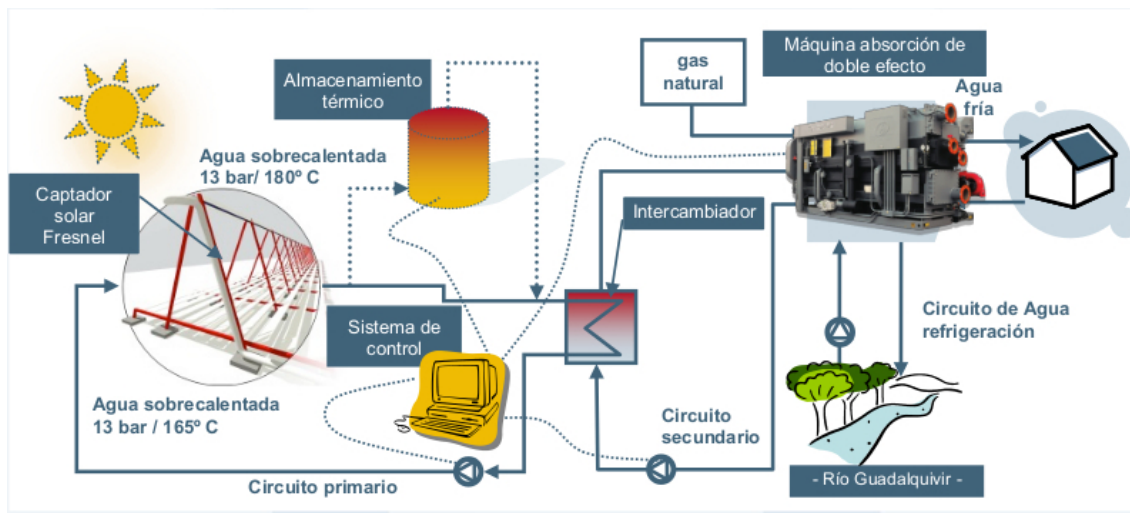


Figura 1.3 Esquema general actual de la PRS de la ETSI de Sevilla.

## 1.2 Breve descripción del funcionamiento de la Planta de Refrigeración Solar de la ETSI

Esta planta de refrigeración solar funciona a partir de un campo de captadores solares lineales de Fresnel que recoge la radiación del sol con objeto de calentar agua hasta unos 180°C. El agua a esta temperatura se utiliza para accionar una máquina climatizadora que transforma la energía térmica en frío, el cual es apto para la climatización de las dependencias de la ETSI. Este tipo de funcionamiento ocurre cuando se necesita generar frío. Sin embargo, en invierno puede cambiar de funcionamiento para producir calor, lo cual lleva a cabo con un rendimiento del 95%.

Como todos los equipos de este tipo, precisa de un sistema de disipación del calor generado en el absorbedor y en el condensador, para lo cual se utiliza un sistema de captación de agua que actúa

<sup>1</sup> <https://www.ambientum.com/ambientum/energia/gas-natural-desarrolla-sevilla-primera-planta-frio-solar-europa.asp>

<sup>2</sup> <http://elcorreoweb.es/historico/la-primera-planta-de-refrigeracion-solar-de-europa-esta-en-cartuja-CDEC142374>

<sup>3</sup> Uno de los más reciente fue presentado por el profesor F. Javier Pino Lucena, en una presentación de la “Plataforma Tecnológica SOLAR CONCENTRA” el 18 de diciembre de 2017 [?].

como sistema de refrigeración. En concreto, se aprovecha el circuito de agua de captación del río Guadalquivir que se creó para todos los edificios de la Exposición Universal del año 1992 (Expo'92) de la Isla de la Cartuja (Sevilla).

Adicionalmente, la máquina de absorción instalada incorpora un quemador de gas natural que entra en funcionamiento como fuente de energía auxiliar, de forma que se garantice la disponibilidad del servicio en momentos de carencia de potencia térmica desde el lado solar. Es decir, cuando la irradiación es insuficiente para accionar la máquina de absorción, la energía proporcionada por el gas natural sirve de apoyo para mantener el proceso en funcionamiento.

En la Figura 1.4 puede seguirse de forma más clara como es el funcionamiento general de la PRS de la ETSI (Sevilla).

### 1.3 Objetivos del Trabajo Fin de Grado

El objetivo de este trabajo es muy simple de enunciar:

*Se pretende llevar a cabo una simulación de las tres principales componentes de la planta de refrigeración solar de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla: Captadores Solares lineales de Fresnel, Acumulador de Energía y Máquina de Absorción de doble efecto.*

*Una vez completadas estas simulaciones, pasar a simular la planta completa.*

La mayor parte del tiempo necesario para completar este trabajo se encuentra en la programación en Matlab. Indicar que parte de esta programación se ha basado en trabajos previos.

Por ello:

*El principal objetivo que se pretende con este trabajo es que todo el material que de él salga, sobretodo los paquetes de Matlab, sea utilizado en el futuro por cualquier persona.*

### 1.4 Estructura del Trabajo Fin de Grado

En lo que sigue, este documento se estructura de la siguiente forma:

- En el **Capítulo 2** se analizan brevemente los captadores solares parabólicos y se comenta las ventajas y desventajas respecto a los captadores lineales de Fresnel, para a continuación describir el funcionamiento de estos últimos; y plantear las ecuaciones que rigen su funcionamiento. Se particulariza a las especificaciones de aquellos de la ETSI de Sevilla y se modelizan éstos. Una simulación es llevada a cabo donde se analiza el comportamiento de la modelización con respecto a datos reales proporcionados por los sensores de la planta.
- La misma estructura del Capítulo 2 es seguida en el **Capítulo 3** sobre un acumulador de energía. En este capítulo se lleva a cabo varias simulaciones. La primera, analiza el comportamiento de la masa de la hidroquinona en los diferentes estados dentro del modelo con el fin de ver si sigue un comportamiento lógico. A continuación, se enlazan en serie los captadores solares con el acumulador de energía y se analiza el comportamiento de la temperatura del agua en diferentes puntos de este sistema simplificado.
- El mismo tratamiento dado al acumulador de energía es realizado en el **Capítulo 4** a la máquina de absorción. Así, se analiza a través de una simulación, el comportamiento individualizado de los componentes principales de ésta y, a continuación, se enlazan en serie los

# Planta de refrigeración solar

Escuela Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

## Captador solar lineal Fresnel

Su funcionamiento es similar al de un concentrador cilindro-parabólico, ya que se basa en reflejar la radiación solar incidente en los espejos primarios, concentrándola en un tubo receptor de vacío por donde circula el fluido caloportador.

En este caso, las once filas de espejos primarios se orientan automáticamente, siguiendo la trayectoria del sol de tal forma que su reflejo siempre incide sobre el receptor, situado a 4 m de altura. Un espejo secundario colocado sobre el tubo receptor se encarga de reflejar la radiación solar que no incide directamente sobre el receptor optimizando, así, la eficiencia óptica del sistema.

**Captador solar Fresnel**  
Área de apertura 352 m<sup>2</sup>  
Agua sobrecalentada  
1,3 MPa/180 °C



## Sistema de acumulación

Está previsto instalar un sistema de almacenamiento térmico por cambio de fase, de forma que la planta pueda acumular los excedentes de energía del campo solar y aprovecharlos en momentos de baja irradiación.

**Sistema de acumulación térmico**

## La máquina de absorción

Igual que sucede con las máquinas climatizadoras eléctricas de compresión, esta tecnología se basa en transferir la energía térmica desde un foco frío a otro caliente mediante la evaporación a baja presión de un fluido refrigerante. En este caso, en lugar de un compresor, se utiliza como fuente de calor el agua a 180 °C procedente del captador solar para mantener vivo el proceso.

Cuando la irradiación es insuficiente, entra en funcionamiento un quemador de gas natural asociado a la máquina de absorción, obteniendo la potencia necesaria para su funcionamiento.

**Climatizadora de absorción de doble efecto**

**Quemador de gas natural**



Escuela Superior de Ingeniería

## Datos técnicos

**Climatizadora (Frigisat-Broad):**  
Ciclo: UBr/H<sub>2</sub>O (doble efecto).  
Potencia de refrigeración: 174 kW.  
Potencia de calefacción: 135 kW.  
COP térmico: 1,3.

**Captador (PSE AC):**  
Longitud: 64 m (16 módulos de 4 m).  
Área de apertura: 352 m<sup>2</sup>.  
Área de ocupación: 480 m<sup>2</sup>.  
Número de espejos primarios: 176.

**Sistema hidráulico (Adima Suzel):**  
2 intercambiadores de calor.  
4 bombas circulatorias gemelas.  
2 bombas circulatorias simples.

## Sistema de refrigeración

Para la refrigeración de la máquina se aprovecha el circuito de agua de captación del río Guadalquivir que se creó para todos los edificios de la Expo'92.

El agua no se toma directamente, sino que existe un intercambiador de calor a través del cual se circula el agua procedente del condensador de la máquina de absorción.

De esta forma no es necesaria la utilización de torres de refrigeración, con todos los problemas de espacio y mantenimiento que esto conlleva.

**Sistema de control**

## Sistema de control

El sistema de control se encarga de optimizar el funcionamiento del sistema, actuando sobre las válvulas, arrancando y parando el captador solar, la máquina de absorción y las bombas del circuito hidráulico e informando de las posibles averías o incidencias. Sirve, también, para extraer información acerca de los caudales, consumos y temperaturas en diversos puntos del sistema, datos que se utilizarán en las tareas de investigación.



Río Guadalquivir

Agua sobrecalentada  
1,3 MPa/165 °C

Circuito primario

Figura 1.4 Esquema general comentado de la PRS de la ETSI (Sevilla) [?].

captadores solares y se analiza el comportamiento de la temperatura del agua en diferentes puntos de este nuevo sistema simplificado.

- En los tres capítulos anteriores se ha insistido mucho en comprobar la calidad de la modelización, primero viendo si ésta captaba el comportamiento real del agua en los puntos más importante de los sistemas considerados, y después cuantificando el error cometido utilizando los cuatro indicadores básicos: Error medio, Raíz cuadrada del error cuadrático medio, Error absoluto medio y Error absoluto porcentual medio. Por ello, el sistema formado por Captadores Solares, Acumulador de Energía y Máquina de Absorción es modelizado en el **Capítulo 5**. En éste siguiendo la metodología de los capítulos anteriores se incide en llevar a cabo diferentes simulaciones y se analizan los resultados.
- Se finaliza el trabajo con un apartado sobre conclusiones y se presenta la bibliografía básica que ha sido usada para su elaboración.

## 2 Captadores Solares lineales de Fresnel

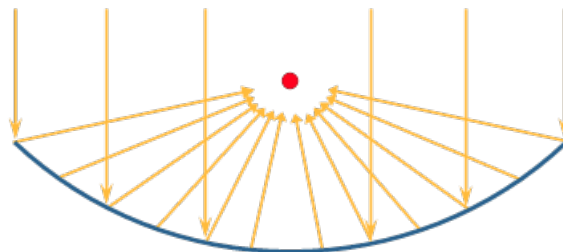
---

En este capítulo se comienza presentando las características principales de los captadores solares parabólicos, para a continuación, estudiar los captadores solares lineales de Fresnel, en concreto, el que se encuentra en las instalaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (Sevilla). Para ello, primero se indica su funcionamiento y descripción, y posteriormente se realiza su diseño e implementación. Dentro de este capítulo también se describe el comportamiento de la temperatura del agua dentro de una tubería. Finalmente, se lleva a cabo unas simulaciones y se analiza el comportamiento de las temperaturas generadas dentro y fuera del colector solar y se presentan los resultados obtenidos.

Ante de comenzar el desarrollo del tema, señalar que un artículo muy recomendable para comprender la importancia y la evolución histórica de la energía solar es el realizado por el profesor Baharoon y otros [?].

### 2.1 Funcionamiento y Descripción

Los captadores (concentradores o colectores) solares lineales de tipo Fresnel son sistemas de seguimiento solar en un eje que siguen el mismo funcionamiento que los colectores parabólicos. Un colector parabólico está compuesto por un canal cuyo perfil tiene forma de parábola, y esta geometría permite que la radiación solar que incide paralela al eje focal de la parábola se concentre en una línea focal donde se coloca un tubo receptor que contiene un fluido que se calienta cuando el tubo absorbe la radiación solar (ver Figuras 2.1 y 2.2).



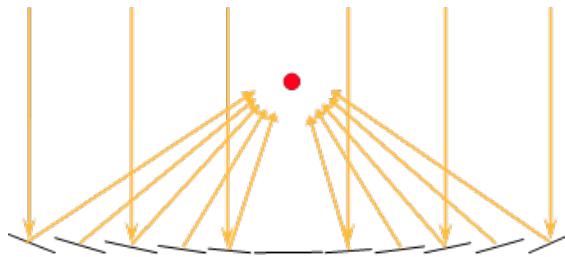
**Figura 2.1** Geometría de los captadores solares parabólicos. El punto rojo representa el foco de la parábola.

Frente al tradicional colector parabólico, surge la opción de los concentradores lineales de Fresnel, que representan una aproximación de un canal parabólico. Este tipo de concentradores

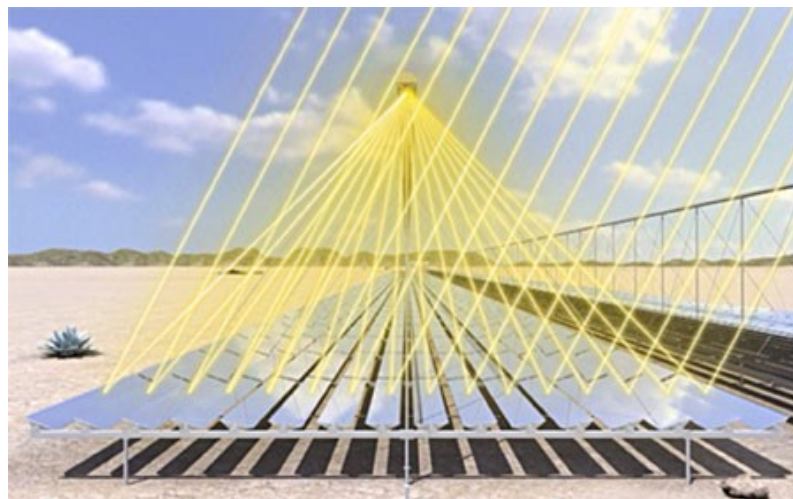


**Figura 2.2** Incidencia de los rayos solares en un captador solar parabólico real.

pueden considerarse como un particionamiento (aproximación de primer orden, lineal) de un perfil parabólico y los segmentos, por comodidad, son colocados en una superficie plana (ver Figuras 2.3 y 2.4).



**Figura 2.3** Geometría lineal de los captadores solares de Fresnel. El punto rojo representa el foco donde inciden los rayos solares.



**Figura 2.4** Incidencia de los rayos solares en un captador solar lineal de Fresnel real.

La idea del captador de Fresnel es lograr mantener fija la zona focal del concentrador y, a cambio

de ello, los delgados segmentos del concentrador redireccionan la radiación solar a la zona focal del sistema. Entre las ventajas de este sistema puede mencionarse que:

- Los motores y el sistema mecánico y estructural son más económicos que en el caso de un canal parabólico convencional. Es fácil hacerse una idea de ello sin más que ver las Figuras 2.2 y 2.4.
- Si los segmentos (reflectores) son suficientemente delgados, pueden ser aproximados por segmentos planos en lugar de tener una determinada curvatura, esto hace aun más barata su construcción. Dichos reflectores son los que se mueven en función del movimiento solar y la época del año.
- El diseño estructural es más económico por estar a nivel del suelo y se aprovecha mejor la superficie, al poder colocarse uno tras otro sin sombreados entre varios sistemas. Al estar a nivel del suelo, también resulta más fácil su mantenimiento y limpieza.
- Este tipo de colector puede calentar el agua en torno a los  $450^{\circ}\text{C}$ -  $500^{\circ}\text{C}$ . Aunque por motivo de seguridad se fija un umbral de funcionamiento muy por debajo de esas cantidades [?].

Sin embargo, este tipo de sistemas tienen un factor de concentración de la energía solar menor que los captadores parabólicos debido a las sombras entre espejos y a no formar una parábola perfecta. En breve, si se lleva a cabo una comparación entre un concentrador lineal de Fresnel y un concentrador cilindro parabólico, se debe señalar que la forma curva de los espejos de los concentradores parabólicos permiten que su eficiencia alcance hasta un 15% más que los espejos de los concentradores Fresnel. Sin embargo, el uso de este tipo de espejos Fresnel proporcionan un gran ahorro en costes y material. Es decir, debido a la simplicidad de su desarrollo y función hacen que se produzca una reducción en el rendimiento<sup>1</sup>, consiguiendo de esta forma que la estructura sea más ligera y que los espejos, los cimientos y las uniones al circuito hidráulico, en general, sean más sencillas y económicas.

Además si se tiene en cuenta que los sistemas Fresnel termosolares no requieren grandes separaciones entre colectores, éstos ocuparán menos espacio y de esta forma se puede minimizar la pérdida de rendimiento con respecto a los captadores parabólicos al poder añadir más colectores en la superficie.

Como resumen de lo anterior y completando otro aspectos se muestra la Tabla 2.1 donde se recoge las principales diferencias entre la tecnología de los captadores parabólicos y los captadores lineales de Fresnel [?, ?].

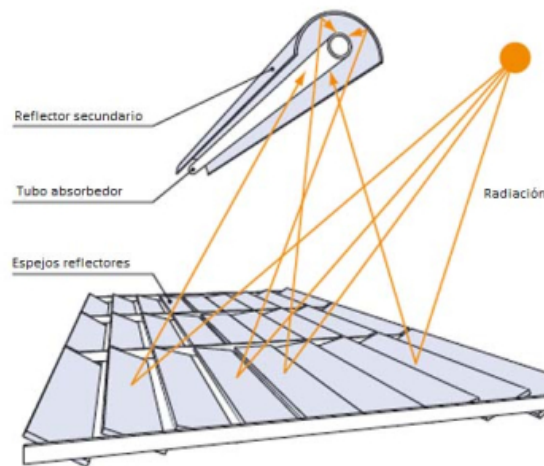
Respecto al funcionamiento general de un campo de captadores solares de Fresnel [?], éste puede seguirse fácilmente a partir de la Figura 2.5, donde se observa que:

- Los rayos solares inciden sobre los paneles solares, cuyo radio de curvatura (geometría parabólica) provoca que estos rayos sean reflejados (incidan) en su foco (línea focal) donde se encuentra el tubo receptor/absorbedor.
- Debido a las diferentes posiciones de los paneles, cada uno de ellos refleja y concentra la luz de diferentes formas y en diferentes cantidades. Por ello es necesario que cada panel tenga un mecanismo de control propio que le permita seguir la trayectoria del sol a lo largo del día de forma independiente unos paneles de otros y, de este modo, pueden reflejar una mayor cantidad de rayos solares sobre el tubo receptor. De esta forma se intenta maximizar el rendimiento del colector solar [?, ?].
- Alrededor de dicho tubo absorbedor se encuentra un espejo reflector secundario para asegurarse que la mayor cantidad posible de rayos incidan sobre el mismo. De igual manera que antes, buscando mejorar el rendimiento del captador.

<sup>1</sup> <https://www.laenergíasolar.org/energía-termica-solar/fresnel-termosolar/>

**Tabla 2.1** Diferencia entre la tecnología de los captadores parabólicos y los captadores lineales de Fresnel [?, ?].

Componente	Tecnología Parabólica	Tecnología Lineal Fresnel
Espejos	Forma de parábola	Montada sobre fondo plano (Producción en masa estandarizada)
Receptor	Se mueve con todo el sistema de canal alrededor del centro de masa	Fijado y separado del sistema reflector
Estructura base	Pesada	Ligera
Sistema de Tuberías	Necesita conexiones flexibles	No necesita
Instalación On-site	Toma largo tiempo	Rápida y fácil
Cargas de viento en colector	Alta	Baja
Superficie de espejos por receptor	Más baja que en Fresnel	Más alta que en parabólico
Eficiencia óptica	Alta	Baja
Uso del suelo	Alta	Baja

**Figura 2.5** Esquema de la incidencia de los rayos solares en un captador lineal de Fresnel.

- A continuación, los rayos solares calientan el exterior del tubo absorbedor y se produce una transmisión de calor a lo largo del espesor del mismo, dentro del cual circula un fluido calo-transportador, en este caso agua, que es calentado. De esta forma, gracias a esa transferencia de calor y a la longitud del tubo receptor, la temperatura del agua se incrementa durante su viaje a través del tubo, para posteriormente ser el agua caliente dirigida al resto de los componentes de la planta, ayudada por una bomba de inyección que la hace circular.

Con respecto al captador que se encuentra en el techo de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, las especificaciones de dicho captador serán las utilizadas para simular y analizar su funcionamiento. Mirando con detalle las siguientes figuras se puede observar que el campo de captadores solares Fresnel están constituidos por:

- Una serie de paneles reflectores de vidrio con un radio de curvatura alto (entre 8,6 y 10,6 m) (ver Figura 2.6), cuyas características principales se recogen en la Tabla 2.2.
- Un tubo receptor de cristal y metal situado en paralelo por encima de los paneles y rodeado de un espejo reflector secundario (ver Figura 2.7). Las dimensiones y propiedades del tubo receptor y del reflector secundario se recogen en las Tablas 2.3 y 2.4.



**Tabla 2.2** Características del sistema de captación solar de Fresnel de la ETSI de Sevilla.

Concepto	Características
Extensión de terreno ocupada	480 m <sup>2</sup>
Superficie reflectora total	352 m <sup>2</sup>
Orientación planta	Este-Oeste (18°)
Número de líneas receptoras	1
Longitud línea receptor	64 m
Tipo de receptor	De cavidad con reflector secundario y de cubierta de vidrio
Altura línea receptor	4 m sobre los espejos
Anchura receptor	0.3 m
Tipo absorbedor	Tubo de acero DIN 1.4541 (AISI 321): Acero inoxidable austenítico estabilizado
Fluido de trabajo	Agua líquida saturada
Generación de vapor	No
Presión de diseño	13 bar
Número de filas de receptores por línea de absorbedor	22 filas
Longitud de cada módulo receptor	4 m
Anchura reflector	0.5 m
Número total de reflectores	176
Reflectividad	0.92
Relación de concentración	25
Potencia Térmica Nominal	120 KW
Fabricante	PSE-MIRROXX (Alemania)

**Tabla 2.3** Dimensiones y propiedades del tubo receptor.

Propiedades	Tubo absorbedor	Cubierta de vidrio
Emisividad	0.14	0.10
Absortividad	0.94	0.06
Transmisividad	-	0.96
Conductividad	16.3 W/mK	0.8 W/mK
Diámetro exterior	70 mm	125 mm
Espesor	2.1 mm	3 mm
Longitud	64 m	64 m
Modelo del tubo de absorción	SCHOTT PTR © 70	

**Tabla 2.4** Dimensiones y propiedades del reflector secundario.

Propiedades	Dimensiones
Absortividad	0.1
Emisividad	0.1
Conductividad	20 W/mK
Longitud	64 m
Diámetro exterior	165 mm
Espesor	5 mm



**Figura 2.6** Estructura y captadores solares de Fresnel de ETSI. Nótese que no hay ninguna estructura más alta que pueda dar sombra a los espejos.



**Figura 2.7** Tubo receptor/absorbedor y espejos secundarios.

- Mecanismos de arrastre y control para el seguimiento solar de los concentradores (reflectores) (ver Figura 2.8).
- Sensor solar, para detectar la posición del sol, y de temperatura, para monitorizar la temperatura (ver Figura 2.9).
- Estructura de acero que mantiene unido los paneles, los mecanismos de control, de seguimiento y sujeta el tubo receptor (ver Figura 2.6).



**Figura 2.8** Mecanismos de arrastre y control para el seguimiento solar de los concentradores. En este caso, se encuentra en vertical y no proyecta la luz solar al tubo absorbedor, es decir, esta en modo de seguridad.



**Figura 2.9** Sensor de luz (izquierda) y sensor de temperatura (derecha).

## 2.2 Diseño e Implementación

Para modelar el funcionamiento del colector solar se parte de las ecuaciones (2.1)-(2.3) discretizadas de transferencia de calor en el metal y en el fluido (ver [?]):

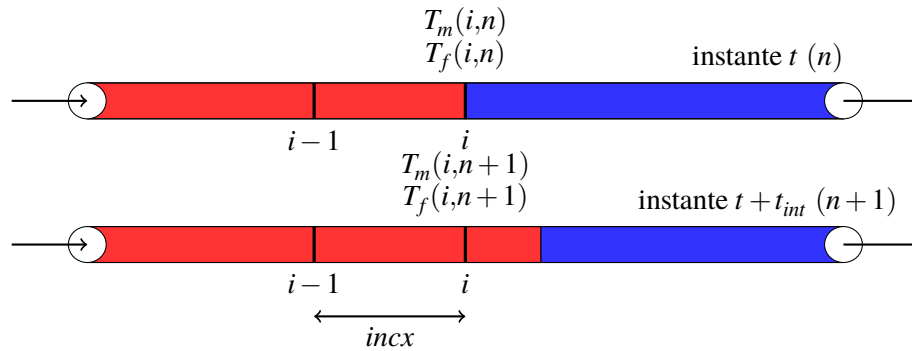
$$T_m(i,n+1) = T_m(i,n) + \frac{t_{int}}{\rho_m \cdot c_m \cdot A_m} \left( I \cdot G \cdot \mu_{media} \cdot \rho_{sombra} \cdot P_{espejos} - \dots \right. \\ \left. H_l(i,n) \cdot G \cdot (T_m(i,n) - T_a) - L \cdot H_t(i,n) \cdot (T_m(i,n) - T_f(i,n)) \right), \quad (2.1)$$

$$T_{fsc}(i,n) = T_f(i,n) + \frac{L \cdot H_t(i,n) \cdot t_{int}}{A_f \cdot \rho_f(i,n) \cdot C_f(i,n)} \cdot (T_m(i,n) - T_f(i,n)), \quad (2.2)$$

$$T_f(i,n+1) = T_{fsc}(i,n) - \frac{q \cdot t_{int}}{A_f \cdot incx(i)} \cdot (T_{fsc}(i,n) - T_{fsc}(i-1,n)), \quad (2.3)$$

donde las variables de entrada, salida y parámetros se pueden ver en las Tablas 2.5 y 2.6. Respecto a los índices naturales  $i$  y  $n$  (ver Figura 2.10), éstos representan:

- $i$ : La tubería que canaliza el fluido se divide en  $N_{trozos}$  creando de esta forma un “Perfil” de la misma. De aquí, el índice  $i$  denota la posición del fluido al final del trozo  $i$ -ésimo.
- $n$ : Para llevar a cabo la simulación se toma un tiempo de integración  $t_{int}$  y en consecuencia el tiempo total de simulación  $T_{sim}$  se divide en unidades ( $ParteEntera(T_{sim}/t_{int})$ ). De aquí, el índice  $n$  se corresponde con el instante  $n \cdot t_{int}$  desde el comienzo de la simulación.



**Figura 2.10** Interpretación gráfica de las ecuaciones (2.1)-(2.3). En rojo y azul se muestra el desplazamiento del fluido dentro del tubo receptor.

**Tabla 2.5** Variables de la modelización del colector solar. El asterisco significa que estos valores se siguen de un conjunto de funciones implementadas en Matlab.

Notación	Significado	Tipo	Unidades
$T_m$	Temperatura del metal	Auxiliar	$^{\circ}C$
$I$	Irradiancia	Datos reales	$W/m^2$
$T_a$	Temperatura ambiente	Datos reales	$^{\circ}C$
$T_f$	Temperatura del fluido	Salida	$^{\circ}C$
$T_{fsc}$	Temperatura del fluido en estacionario	Auxiliar	$^{\circ}C$
$q$	Caudal	Datos reales	$L/s$
$P_{espejos}$	Porcentaje de espejos	Datos reales	-
$H_l^*$	Coefficiente de pérdidas metal-ambiente	Auxiliar	$W/m^2^{\circ}C$
$H_t$	Coefficiente de transmisión de calor por convección metal-fluido	Auxiliar	$W/m^2^{\circ}C$
$\rho_f^*$	Densidad del fluido	Auxiliar	$kg/m^3$
$C_f^*$	Calor específico del fluido	Auxiliar	$J/kg^{\circ}C$

En referencia a estas variables y parámetros indicar que:

- Los valores de cada parámetro se han obtenido mediante búsquedas en internet y consultas en publicaciones de referencia.
- Los datos reales se han obtenido de diferentes medidas tomadas por los sensores del captador de Fresnel de la ETSI a lo largo de diferentes días y años. Estos datos se encuentran en ficheros de Matlab que fueron facilitados por el tutor.
- Las variables y parámetros señalados con un asterisco en las Tablas 2.5 y 2.6 se han identificado con datos del sistema real.

**Tabla 2.6** Parámetros de la modelización del colector solar. El asterisco significa que estos valores se siguen de un conjunto de funciones implementadas en Matlab.

Variables	Significado	Valores	Unidades
$t_{int}$	Tiempo de integración	0.25	$s$
$\rho_m$	Densidad del metal (DIN 1.4404)	8027	$kg/m^3$
$C_m$	Calor específico del metal	500	$J/kg^\circ C$
$A_m$	Área transversal del tubo completo	0.00032751	$m^2$
$G$	Apertura del colector	5.5	$m$
$\mu_{media}^*$	Eficiencia media de los paneles	0.3521	-
$\rho_{sombra}^*$	Factor de sombra	0.9264	-
$L$	Diametro propio del tubo	0.2136	$m$
$A_f$	Área transversal del tubo en la zona del fluido	0.00196	$m^2$

Respecto a  $incx$ , el espacio que se deja entre cada uno de los trozos del perfil de la tubería del captador (ver Figura 2.10), medido en metros, se ha considerado que puede tomar 2 valores distintos:

- $incx = 1$ ; este es el incremento en la longitud del tubo receptor; y
- $incx = 1.5$ ; este es el incremento en la longitud de una tubería (de 3 m) que conecta la tubería procedente de la planta con el tubo receptor y de otra tubería de 3 m que conecta el tubo receptor con el resto de la planta.

El tratamiento de las ecuaciones se lleva a cabo a partir del método de integración de Euler, donde los valores iniciales de la temperatura de entrada en los captadores (proveniente de otras componentes de la planta) se siguen de datos reales de determinados días del año. De modo que se implementa con un bucle externo que vaya leyendo los parámetros, es decir:

1. Se usan los parámetros para calcular los primeros valores de las curvas.
2. Se usan los parámetros para calcular los siguientes valores de las curvas.
3. Se integra dicho el trozo de curva entre esos valores.
4. Se vuelve al paso 1.

## 2.3 Modelado de una tubería

Las tuberías de una planta son las encargadas de unir los diferentes componentes de la misma para el transporte de algún fluido, en nuestro caso agua (ver Figura 2.11). Una tubería que sea la salida de un captador de Fresnel, es especialmente importante ya que el fluido que la atraviesa viene a alta temperatura y debe ser deseable que durante su paso por ella no pierda mucha temperatura.

El modelo de tubería es un modelo de transporte de masa cuyas ecuaciones son similares al modelo de parámetros distribuidos del captador Fresnel, pero considerando radiación 0. Por ello, el comportamiento de la temperatura en las tuberías es muy similar al del tubo receptor del captador solar, ya que se plantean similares ecuaciones de transferencia de calor en el metal y el fluido, excepto porque el exterior de la tubería esta a temperatura ambiente y no se ve magnificado por el efecto de la radiación solar.

Las ecuaciones para modelar el funcionamiento de una tubería parte de las ecuaciones (2.1)-(2.3) discretizadas de transferencia de calor en el metal y en el fluido, donde debido a la ausencia de espejos y por tanto de radiación solar pueden escribirse de manera más simple como sigue:



Figura 2.11 Imagen de distintas tuberías.

$$T_{fsc}(i,n) = T_f(i,n) - \frac{L \cdot H_f(i,n) \cdot t_{int}}{A_f \cdot \rho_f(i,n) \cdot C_f(i,n)} \cdot (T_f(i,n) - T_a), \quad (2.4)$$

$$T_f(i,n+1) = T_{fsc}(i,n) - \frac{q \cdot t_{int}}{A_f \cdot incx} \cdot (T_{fsc}(i,n) - T_{fsc}(i-1,n)). \quad (2.5)$$

Las especificaciones de la tubería recogidas en este trabajo se refieren a la longitud, espesor, y diámetro de la misma. El perfil de la tubería dependerá de la longitud de la misma y ello se manifiesta en la ecuación (2.5) a partir de  $incx$ .

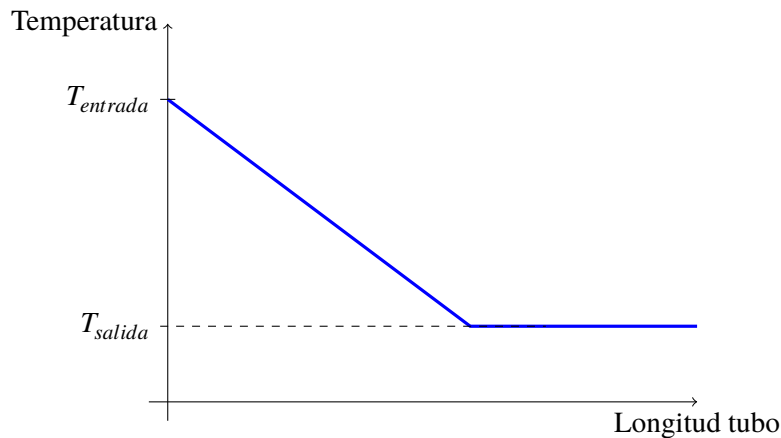
Respecto a su comportamiento, éste se verá dentro de la simulación del captador solar en el siguiente apartado. Sin embargo, es conveniente decir, que generalmente la temperatura del fluido que se mueve por la tubería suele tener una temperatura mayor que la temperatura ambiente y es por ello, que la temperatura de entrada del fluido en la tubería es mayor que la temperatura a la salida y evidentemente ello se indica en la Figura 2.12 después de un retraso que coincide con el tiempo que tarda el fluido en recorrer la tubería. Este tiempo  $T$ , depende del caudal  $q$ , la sección del tubo  $A_f$  y su longitud  $L$  según la siguiente expresión:

$$T = \frac{L \cdot A_f}{q}. \quad (2.6)$$

En estudios realizados por el profesor F. Javier Pino Lucena se pone de manifiesto que hay unas pérdidas térmicas elevadas en la red de transporte del fluido caloportador entre captador de Fresnel y máquina de absorción. Ello se tendrá ocasión de comprobarlo ya que esta tubería tiene una longitud aproximada de 250 metros.

## 2.4 Simulación y Resultados

En esta primera simulación, se considerará exclusivamente un captador solar unido a una tubería (ver Figura 2.13), con objeto de ver las características principales de su funcionamiento. En concreto, de la temperatura del agua en diferentes puntos del sistema considerado.



**Figura 2.12** Representación gráfica lineal del comportamiento de la temperatura de salida del agua de una tubería en función de la longitud de la misma.



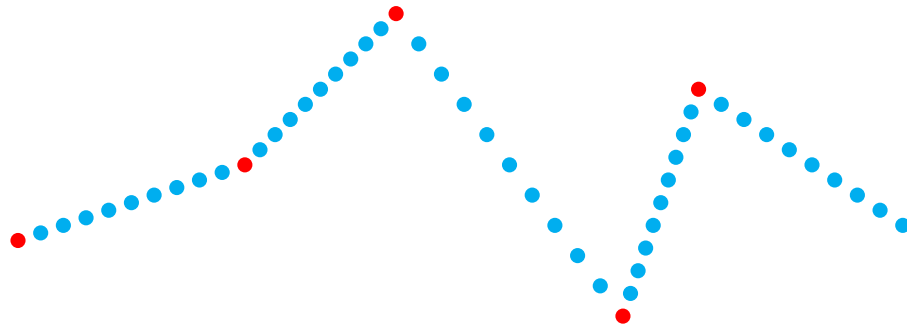
**Figura 2.13** Montaje inicial: Captadores solares de Fresnel-Tubería.

Para ello, se usan datos reales correspondientes al día 29 de junio de 2009, los cuales se encuentran recogidos en el fichero *F290609.m*. Los datos proporcionados en este fichero hacen referencia a las siguientes variables de entrada:

- Horas del día
- Hora solar
- Irradiancia solar ( $I$ )
- Temperatura de entrada del agua en los captadores
- Temperatura de salida del agua de los captadores
- Temperatura ambiente ( $T_a$ )
- Caudal de agua ( $q$ )
- Porcentajes de espejos ( $P_{espejos}$ )

Estos datos fueron recogidos por diferentes sensores de la planta, los cuales tomaron muestras cada minuto a lo largo de 7 horas del día, es decir, se tienen 420 muestras diarias.

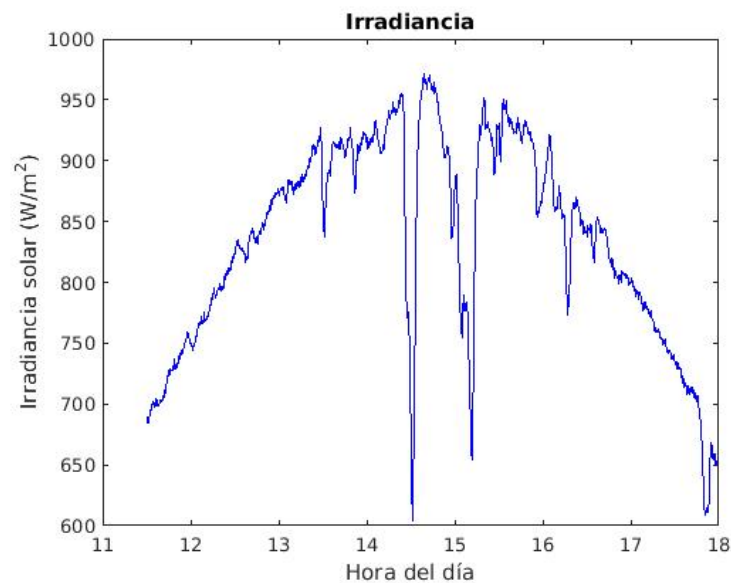
Sin embargo, antes de la simulación se debe llevar a cabo un proceso de interpolación lineal con estos datos ya que el incremento de tiempo usado en la simulación es de 0.25 segundos, es decir,  $t_{int} = 0.25s$ . La interpolación es llevada a cabo mediante la función *interpola.m* y su utilidad puede seguirse de la Figura 2.14. De este modo, por cada dos valores consecutivos proporcionados en el fichero *F290609.m*, se obtienen 240 nuevos valores ( $60 / 0.25$ ), lo que resulta un total de 100560 valores ( $419 \times 240$ ).



**Figura 2.14** Interpolación lineal. Los puntos originales se muestran en rojo y los puntos obtenidos por interpolación en azul.

Con respecto a la tubería se ha considerado una longitud de 250 metros, un diámetro de 0.2 metros y un perfil con 25 trozos ( $incx = 10$ ).

Uniéndose ambos componentes y realizando una simulación se obtienen las Figuras 2.15 y 2.16, las cuales se pasan a comentar:

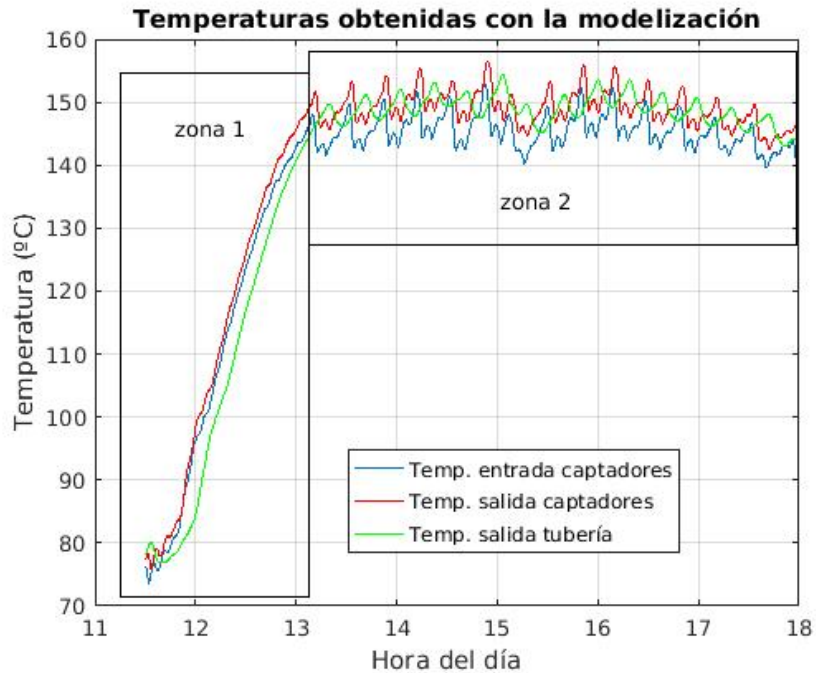


**Figura 2.15** Irradiación solar correspondiente al 29 de junio de 2009 en el techo de ETSI (Sevilla).

- En la Figura 2.15 se observa el comportamiento de la irradiancia solar a lo largo del día 29 de junio de 2009. Dicho comportamiento general consiste en un incremento de la irradiancia a lo largo de las horas de la mañana y un posterior descenso debido al recorrido del sol cuando avanza la tarde. También se destacan unos picos de descenso muy pronunciados a ciertas horas del día, provocados seguramente por la aparición de nubes, las cuales ocultan el sol e impiden que sus rayos lleguen a los paneles.
- En la Figura 2.16, se puede apreciar el comportamiento de las diferentes temperaturas del agua dentro del modelo simulado desde las 11:30 de la mañana<sup>2</sup> hasta las 18:00 de la tarde. Así, se observa que la temperatura de entrada del agua (línea azul) en los captadores sigue una evolución predeterminada obtenida de los datos reales, y la temperatura de salida del

<sup>2</sup> Se elige esta hora ya que es el inicio de operación de la máquina de absorción.





**Figura 2.16** Temperatura del agua en diferentes puntos del sistema captador + tubería obtenidas en la simulación.

agua (línea roja) de los captadores es mayor, es decir, el agua que ha pasado a través del tubo receptor se ha calentando. Además, la temperatura del agua a la salida de los captadores sigue una evolución coherente con los cambios en la irradiancia solar. Así, al principio la temperatura de salida va creciendo hasta la llegada a las horas centrales, a partir de las cuales empieza a decrecer de forma suave.

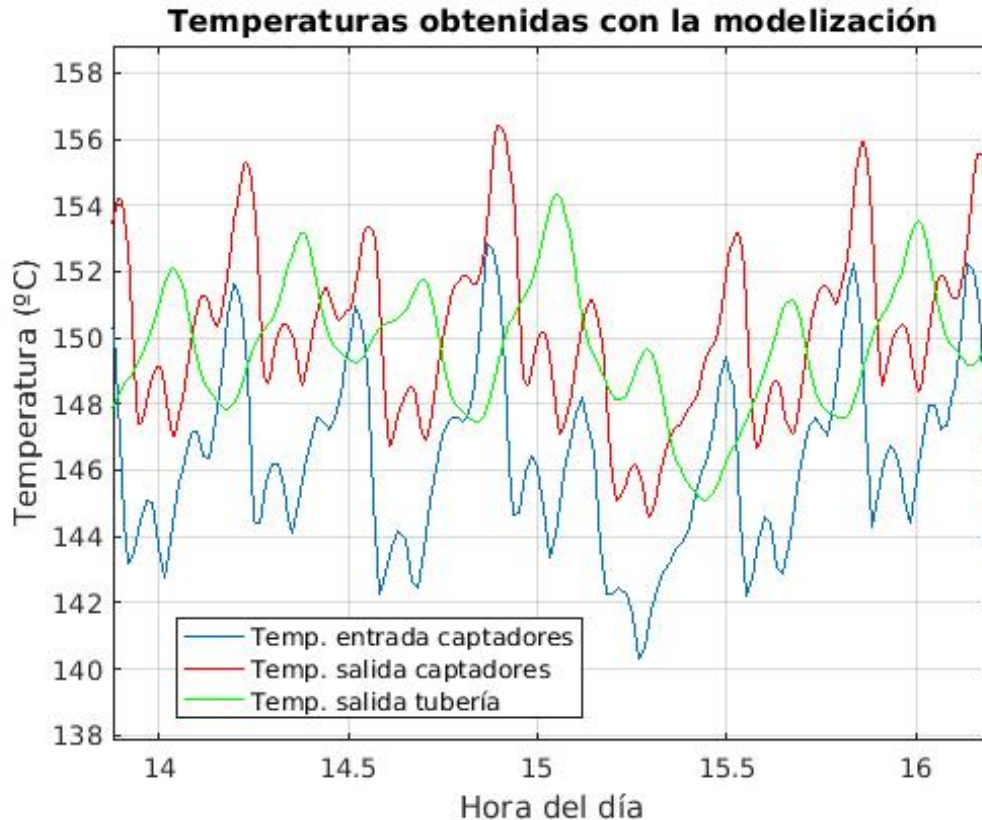
Los picos de decrecimiento en la irradiancia, se observa también en la temperatura de salida, pero con un menor efecto como cabe esperar.

A continuación, el agua calentada que sale de los captadores entra en la tubería y finalmente sale de ésta (línea verde).

El comportamiento de la salida del agua de la tubería es como sigue:

- Al principio, el agua empieza siendo más fría que a la entrada de los captadores. Esto es debido a que las paredes de la tubería están a muy baja temperatura y en el proceso de transmisión de calor, el agua debe ceder mucha energía para ir poco a poco calentando el perfil de la tubería (Figura 2.16, zona 1).
- Al cabo del tiempo, la temperatura de salida del agua de la tubería empieza a ser superior a la temperatura de entrada en los captadores y se mantiene así hasta el final de la simulación. Ello es debido a que el agua caliente ha estado calentando también las paredes de la tubería y la pérdida de calor del agua ya no es tan grande como al principio. Al ser la transmisión de calor del agua inferior, motiva que la temperatura del agua a la salida de la tubería sea menor que la temperatura a la salida de los captadores (Figura 2.16, zona 2).
- Hay que tener en cuenta que la temperatura a la salida de dicha tubería presenta un cierto tiempo de retraso con la proporcionada por la salida de los captadores, debido al tiempo que necesita el agua para recorrer la tubería. Ello se puede ver gráficamente observando como los picos en la temperatura de salida del colector se reproduce en los picos de la temperatura de salida de la tubería un poco más tarde (ver Figura 2.17).

Es muy importante señalar lo apuntado al final de la Sección 2.3 referente a la pérdida de calor del agua cuando atraviesa la tubería. Sin ser muy preciso, a la vista de la Figura 2.17, se sigue de los picos de las temperaturas de entrada, salida del agua de los captadores y de salida de la tubería, que se pierde alrededor del 50% de la temperatura del agua ganada en los captadores de Fresnel.



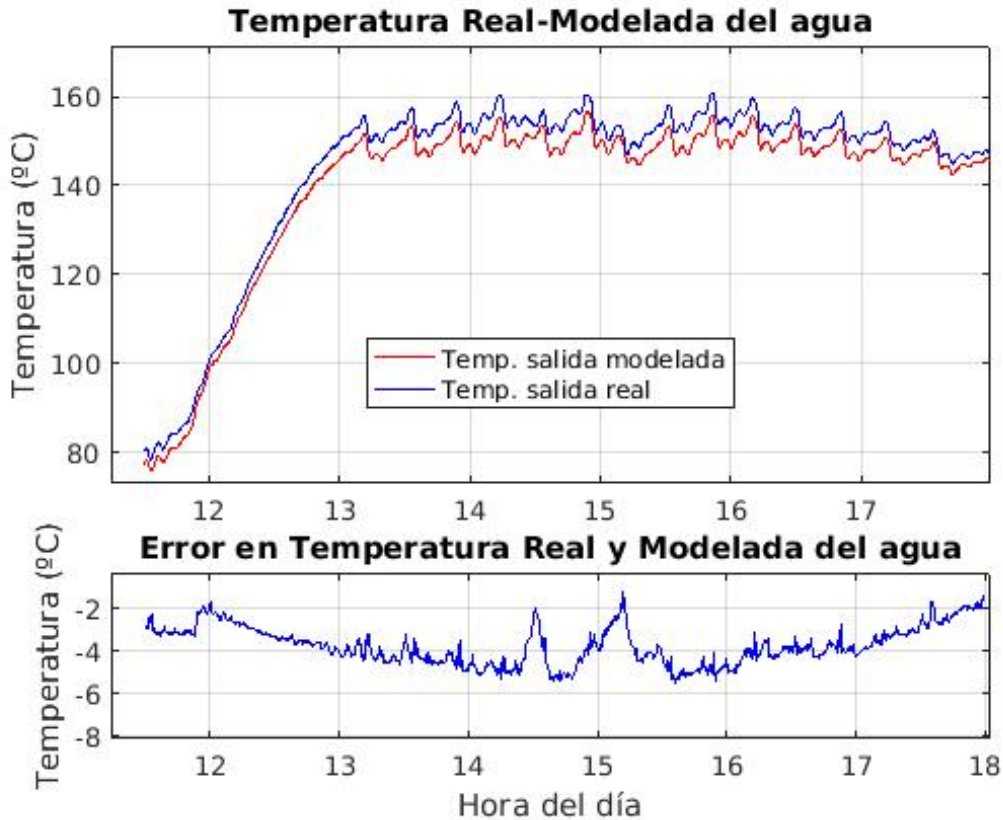
**Figura 2.17** Visualización de la ganancia de temperatura del agua en los captadores y la pérdida de la misma a su paso por la tubería.

Por ejemplo, si nos fijamos en los resultados en torno a las 15 horas del día, se ve en los picos de las temperaturas del agua, que gracias a los captadores solares se gana unos cuatro grados, pero en el recorrido por la tubería se pierde aproximadamente dos grados.

Volviendo de nuevo a la temperatura de salida proporcionada por la modelización de los captadores solares, es necesario comprobar si el modelo se aproxima suficientemente bien a la realidad y esto es posible verlo puesto que conocemos cual ha sido la temperatura real proporcionada por los sensores de temperatura en los captadores. De esta forma en la Figura 2.18 se ha representado ambas temperaturas, así como el error cometido por la modelización. En dicha figura se observa que el modelo replica bien el comportamiento real. Sin embargo, se observa que siempre proporciona un valor menor al real.

Con objeto de cuantificar los errores, denotados por  $e = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T$ , donde  $e_i = M_i - R_i$  siendo  $M_i$  el valor proporcionado por el modelo y  $R_i$  el valor real, se han utilizado los indicadores mostrados en la Tabla 2.7. En dicha tabla también se muestran los valores de estos indicadores para la modelización llevada a cabo con los captadores solares.

Si se analizan estos indicadores, se puede señalar que el error medio es negativo lo que significa, como se dijo anteriormente, que el modelo tiende a subestimar la temperatura real y en este caso ocurre con todas y cada una de las mediciones puesto que  $EM$  y  $EAM$  coincide exactamente salvo en el signo. Los indicadores anteriores son indicadores absoluto, lo cual hace que no se puede



**Figura 2.18** Comparativa gráfica entre la temperatura real y la temperatura modelada del agua en la salida de los captadores solares del día 29 de junio de 2009.

**Tabla 2.7** Indicadores de calidad del error. Errores en la modelización del captador solar del día 29/06/2009.

Indicador	Ecuación	Captador
Error Medio ( <i>EM</i> )	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$	-3.73
Raiz Error Cuadrático Medio ( <i>RECM</i> )	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}$	3.84
Error Absoluto Medio ( <i>EAM</i> )	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  e_i $	3.73
Error Absoluto Porcentual Medio ( <i>EAPM</i> )(%)	$100 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left  \frac{e_i}{R_i} \right $	2.36

cuantificar suficientemente bien la bondad de la modelización<sup>3</sup>, por ello resulta más interesante ver el *EAPM* que nos dice que el modelo se equivoca en cada medición entorno a un 2.36%, el cual en una primera modelización, como la que se ha realizado en este trabajo, creemos que resulta aceptable.

<sup>3</sup> Esto se puede entender mejor con el siguiente ejemplo: Al calcular una distancia, no podemos equivocarnos en 3 m, pero no es lo mismo ese error en medir la distancia entre dos alumnos que se encuentran en el mismo aula de la ETSI que ese error en medir la distancia entre dos ciudades de Andalucía.



## 3 Acumulador de Energía

---

En este capítulo se estudian los acumuladores de energía, y en concreto el que se encuentra ubicado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Para ello, primero se indica su funcionamiento y descripción, para a continuación realizar su diseño e implementación. Finalmente se lleva a cabo dos simulaciones; en la primera se ve el comportamiento de las temperaturas dentro del acumulador; y en la segunda, se monta el captador solar con el acumulador en serie y se analizan los resultados.

### 3.1 Funcionamiento

Un acumulador de energía es un sistema de almacenamiento en forma de calor latente (ver Figura 3.1). Este tipo de almacenamiento consiste en calentar un determinado material con unas características especiales hasta conseguir que se produzca un cambio de fase (sólido  $\mapsto$  líquido o líquido  $\mapsto$  gaseoso). Sin embargo, la mayoría de estos materiales presentan el gran inconveniente de tener un



**Figura 3.1** Acumulador de Energía de la ETSI de la Universidad de Sevilla.

bajo coeficiente de conductividad del calor, por lo que se deben emplear métodos de mejora de la

transmisión energética para así aumentar el rendimiento y la utilidad del sistema de almacenamiento.

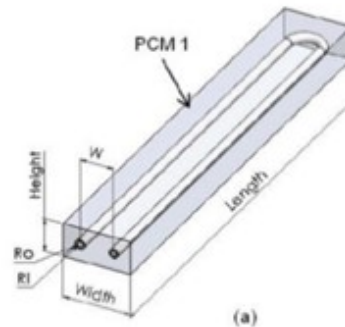
Estos acumuladores tienen la ventaja de ser una fuente de calor con una gran densidad de almacenamiento que permite suministrar energía a una temperatura constante. A esta energía se la denomina calor latente de fusión (sólido  $\mapsto$  líquido) o de vaporización (líquido  $\mapsto$  Gaseoso), según el caso. Este proceso físico se utiliza para almacenar energía en forma de calor hasta que sea necesaria, momento en el cual se producirá el proceso inverso (líquido  $\mapsto$  sólido o gaseoso  $\mapsto$  líquido) y se podrá recuperar gran parte de la energía inicial suministrada. Los materiales usados para almacenar energía térmica en forma de calor latente son conocidos como “Phase Change Materials” (abreviadamente PCMs).

En concreto, el material usado para almacenar la energía en el acumulador de la ETSI es la hidroquinona y el almacenamiento que tiene lugar es de calor latente en fase sólida  $\mapsto$  líquida. Dicho tipo de almacenamiento en calor latente es el más desarrollado y aplicado en casos reales.

El tanque de almacenamiento de energía es un intercambiador de calor carcasa-tubo que consiste en una serie de tubos por donde circula el fluido caloportador y el PCM se encuentra relleno el espacio entre los tubos y la carcasa. Durante el proceso que se produce en el acumulador, el PCM absorbe o cede una enorme cantidad de energía calorífica del fluido que le permite, si se supera determinados umbrales, hasta cambiar de fase.

Este sistema de almacenamiento térmico dentro de la PRS de la ETSI es necesario para los momentos en que existe un exceso de producción de energía por parte de los captadores solares y la demanda de otros equipos de la planta no requieren toda la energía producida. De esta forma, la energía acumulada puede utilizarse en los momentos que la temperatura de los captadores solares esté por debajo de la necesitada por el resto de equipos de la planta. También se suele usar al principio del día para aprovechar la energía de los captadores para cargar el acumulador y de esta forma tenerla disponible a lo largo del día por si fuese necesario proporcionar energía al resto de la planta.

El proceso de fusión que se produce en el acumulador es como sigue: Si nos fijamos en la Figura 3.2, se puede observar un modelo simplificado de un tanque de tubos de un acumulador

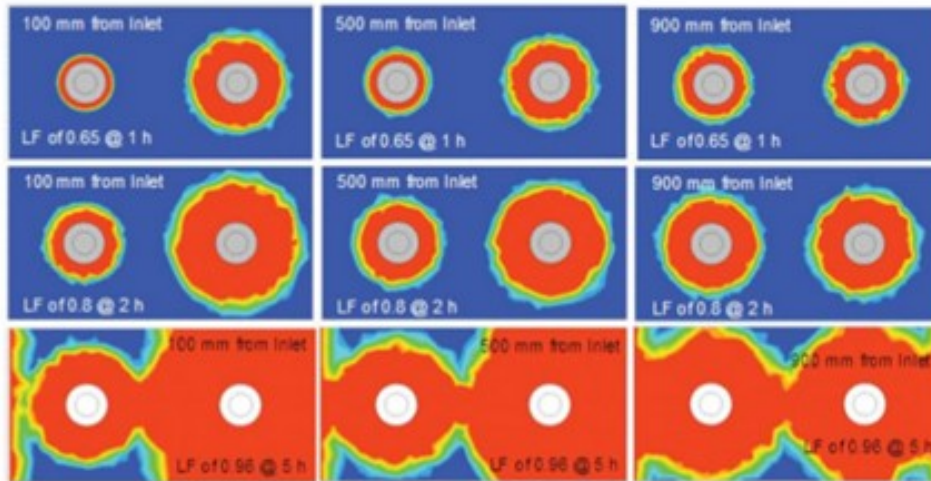


**Figura 3.2** Modelo simplificado de un tanque de tubos de un acumulador de energía.

de energía que puede ayudarnos con la explicación. Así, el fluido va atravesando el tubo a una alta temperatura y por conducción transmite el calor al material que se encuentra recubriendo el tubo, inicialmente en estado sólido (Agua  $\mapsto$  Metal del tubo  $\mapsto$  PCM – conducción). Este material conforme va aumentando su temperatura forma una película líquida alrededor del sólido, la cual se va expandiendo transmitiéndose el calor dentro del material por convección natural (PCM  $\mapsto$  PCM – convección). El proceso de solidificación, por otra parte, está dominado fundamentalmente por procesos conductivos, salvo por la fase inicial con predominancia de la convección natural.

En la Figura 3.3 se observa como tras el paso de un fluido a temperatura superior a la de fusión del material PCM se produce un proceso de cambio de fase de sólido a líquido [?]. Se muestra en

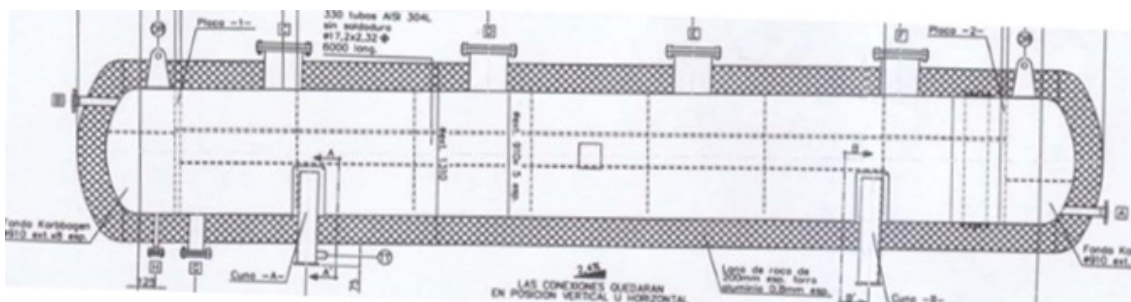
diferentes secciones del sistema de tuberías y a diversos instantes de tiempo (1, 2 y 5 horas). La figura muestra cómo la fracción líquida (en color rojo) alrededor del tubo va creciendo en detrimento de la fracción sólida (en color azul) aproximadamente de forma constante a lo largo del tiempo y a lo largo de todas las secciones.



**Figura 3.3** Secciones transversales de un sistema PCM en diferentes momentos del cambio de fase para diferentes puntos del almacenador. Rojo indica líquido y azul indica sólido.

## 3.2 Descripción

El acumulador de energía de la ETSI es un intercambiador de calor formado por un conjunto de tubos dentro de una carcasa. Este acumulador consta de 3 pasos, de 109 tubos, cada uno de 6 metros de longitud, de manera que el recorrido total de cada uno de los 109 tubos dentro del tanque es de 18 metros. El esquema del acumulador se muestra en la Figura 3.4 y sus características se indican en la Tabla 3.1.



**Figura 3.4** Esquema del acumulador de la ETSI de Sevilla.

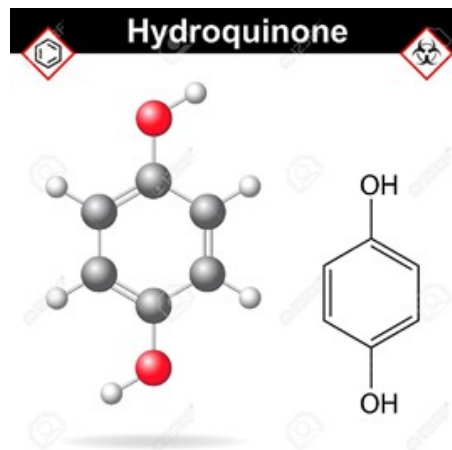
Por el interior de los tubos circula el fluido que transporta el calor, en este caso el agua procedente de los captadores de Fresnel, y en el espacio que se encuentra entre los tubos y la carcasa se encuentra el material de cambio de fase, la hidroquinona<sup>1</sup> (ver Figura 3.5) cuyas características<sup>2</sup> se recogen en la Tabla 3.2.

<sup>1</sup> Dihidroxibenceno, Hidroquinol, Bencenodiol

<sup>2</sup> <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/101a200/nspn0166.pdf>

**Tabla 3.1** Características del acumulador de la ETSI.

Características	Valores
<b>Acumulador</b>	
Peso en vacío	4100 Kg
Peso lleno de agua	8150 Kg
Capacidad de almacenamiento	291 KWh
Potencia máxima	149.9 KW
Salto de temperatura máximo	30 °C
<b>Carcasa</b>	
Temperatura de diseño	200 °C
Presión de diseño	1 bar
Volumen	3300 L
<b>Tubos</b>	
Temperatura de diseño	200 °C
Presión de diseño	15 bar
Volumen	750 L

**Figura 3.5** Composición química de la Hidroquinona:  $C_6H_6O_2$  /  $C_6H_4(OH)_2$ . Dihidroxibenceno. Masa molecular: 110.1.**Tabla 3.2** Características básicas de la Hidroquinona.

Características	Estado		Unidades
	Sólido	Líquido	
Densidad	1358	1155	$Kg/m^3$
Calor Específico	2310	2670	$J/Kg^{\circ}C$
Temperatura de Fusión	170.3		$^{\circ}C$
Calor latente	230000		$J/Kg$
Temperatura de Ebullición	287.0		$^{\circ}C$

El funcionamiento del acumulador de energía consiste en:

- La energía del acumulador proviene del calor del agua que le proporciona los captadores solares. Así, cuando la temperatura del agua dentro de los captadores solares sobrepasa la energía requerida por el resto de componente de la PRS y es superior a la temperatura inicial en la que se encuentra la hidroquinona, parte del caudal o incluso todo el caudal del agua debe ser recirculado hacia el acumulador de energía.



- En este caso, la temperatura del agua será mayor que la temperatura de la hidroquinona. Por la transferencia de calor, ésta aumentará su temperatura. Si la temperatura de la hidroquinona alcanzase la temperatura de fusión (170.3 °C), el calor procedente del agua será utilizado para el cambio de fase (sólido  $\mapsto$  líquido). Tanto en un caso como en otro, la hidroquinona almacenará energía a través de la transferencia de calor con el agua.
- Cuando se necesita dicha energía acumulada, se hará pasar un caudal de agua a baja temperatura proveniente de los captadores o de otro componente de la planta a través del acumulador. Lo cual provocará una cesión de calor, es decir, el nuevo caudal de agua tendrá una temperatura menor a la de la hidroquinona sólida o líquida y, por lo tanto, el calor se transmitirá hacia el agua. Si la hidroquinona se encuentra en estado líquido, esta transmisión de calor provoca a su vez que disminuya la cantidad de hidroquinona líquida y aumente la sólida debido a la solidificación al disminuir la temperatura.

El funcionamiento del acumulador se podrá apreciar con detalle cuando se lleve a cabo una simulación del mismo.

### 3.3 Diseño e Implementación

Para la modelización del acumulador de energía se parte de la hipótesis que el acumulador es un tanque con un único tubo rodeado de hidroquinona, en lugar de muchos tubos pequeños. Cuando se plantean las ecuaciones de transferencia del calor hay que distinguir que el tratamiento difiere según los posibles estados de la hidroquinona: estado sólido, de fusión o líquido<sup>3</sup>. La ecuación (3.1) permite evaluar la cantidad de energía ( $Q$ ) que una determinada cantidad de material ( $m$ ) es capaz de almacenar:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m \cdot C_p \cdot dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m \cdot C_p \cdot dT \quad (3.1)$$

En estas ecuaciones se representa:

- En el primer término, la energía que es capaz de almacenar en forma de calor sensible desde su temperatura inicial ( $T_i$ ) hasta que comienza el cambio de fase ( $T_m$ ).
- En segundo lugar, se muestra un término que tiene en cuenta la energía total almacenada en forma de calor latente. Este término tiene en cuenta la cantidad de material, el calor específico del cambio de fase y la fracción del material que ha experimentado la transformación.
- Si una vez finalizado el cambio de fase se continúa calentando el material, es necesario utilizar el tercer término de la ecuación. Este término es idéntico al primero solo que se lleva a cabo en distinto estado de la materia.

Siguiendo esta ecuación (3.1), para la implementación de los cambios de temperaturas del tanque en Matlab, se distingue según se encuentren en los diferentes tramos: i) estado sólido o líquido; y ii) en fusión o solidificación. De esta forma, las ecuaciones que se modelan son:

**Estado Sólido o Líquido:** En este caso, toda la masa de la hidroquinona se encuentra en estado sólido o en estado líquido, no habiendo intercambio de masas entre los dos estados.

$$m_s = M, \quad m_l = 0, \quad (\text{Estado sólido}) \quad \text{ó} \quad m_s = 0, \quad m_l = M, \quad (\text{Estado líquido})$$

<sup>3</sup> La temperatura de funcionamiento de la planta se controla de tal forma que nunca será lo suficientemente alta para que la hidroquinona pase a estado gaseoso (vaporización).

Las ecuaciones que rigen la temperatura de la hidroquinona y la temperatura del fluido son:

$$C_h \frac{\partial T_h}{\partial t} = A_c \cdot N \cdot A_t \cdot H_t \cdot (T_f - T_h) - A_{tanque} \cdot L \cdot (T_h - T_a), \quad (3.2)$$

$$C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = -A_c \cdot N \cdot A_t \cdot H_t \cdot (T_f - T_h) - q \cdot C_f \cdot \rho_f \cdot (T_f(t) - T_f(t-1)). \quad (3.3)$$

**Estado de Fusión o Solidificación:** Las temperaturas de la hidroquinona y del fluido permanecen constantes. Las ecuaciones que rigen el cambio de masas entre los diferentes estados de la hidroquinona es:

Estado sólido  $\mapsto$  Estado líquido (Fusión)

$$T_h = 170.3 < T_f$$

$$C_{lat} \frac{\partial m_s}{\partial t} = A_c \cdot N \cdot A_t \cdot H_t \cdot (T_f - T_h) - A_{tanque} \cdot L \cdot (T_h - T_a), \quad (3.4)$$

$$m_s + m_l = M.$$

Estado líquido  $\mapsto$  Estado sólido (Solidificación)

$$T_h = 170.3 > T_f$$

$$C_{lat} \frac{\partial m_l}{\partial t} = A_c \cdot N \cdot A_t \cdot H_t \cdot (T_f - T_h) - A_{tanque} \cdot L \cdot (T_h - T_a), \quad (3.5)$$

$$m_s + m_l = M,$$

donde las variables y parámetros se muestran en las Tablas 3.3 y 3.4.

**Tabla 3.3** Variables de entrada y salida en el acumulador de energía.

Notación	Significado	Tipo	Unidades
$T_h$	Temperatura de la hidroquinona	Salida	$^{\circ}C$
$T_f$	Temperatura del agua	Salida	$^{\circ}C$
$T_a$	Temperatura ambiente	Datos reales	$^{\circ}C$
$q$	Caudal	Datos reales	$L/s$
$m_s$	Masa de la hidroquinona en sólido	Salida	$Kg$
$m_l$	Masa de la hidroquinona en líquido	Salida	$Kg$
$C_f$	Capacidad térmica del agua	Auxiliar	$J/^{\circ}C$
$H_t$	Coefficiente de transmisión de calor	Auxiliar	$W/m^2^{\circ}C$
$\rho_f$	Densidad del agua	Auxiliar	$Kg/m^3$

Los valores de cada parámetro se han obtenido mediante búsquedas en internet, consultas en libros de referencia, datos reales y funciones de Matlab proporcionadas por el tutor. Además, dentro de modelización se ha tenido en consideración que la hidroquinona no puede ser calentada con una velocidad mayor de  $8.33 \cdot 10^{-3} ^{\circ}C/s = 0.5^{\circ}C/min$ .

El método de integración usado en la simulación del acumulador de energía es el mismo que en los captadores solares, o sea se implementa con un bucle externo que vaya leyendo los parámetros.

Tabla 3.4 Parámetros en el acumulador de energía.

Notación	Significado	Valores	Unidades
$C_h$	Capacidad térmica de la hidroquinona	2670	$J/^\circ C$
$A_c$	Coefficiente de correlación del área del tanque	0.7	-
$N$	Número de tubos	109	-
$A_t$	Área del tubo	11.310	$m^2$
$L$	Coefficiente de pérdida del tanque	10	-
$C_{lat}$	Calor Latente de la hidroquinona	230000	$J/Kg$
$A_{tanque}$	Área del Tanque	Constante	$m^2$
$M$	Masa total de la hidroquinona	4500	$Kg$

### 3.4 Simulación y Resultados

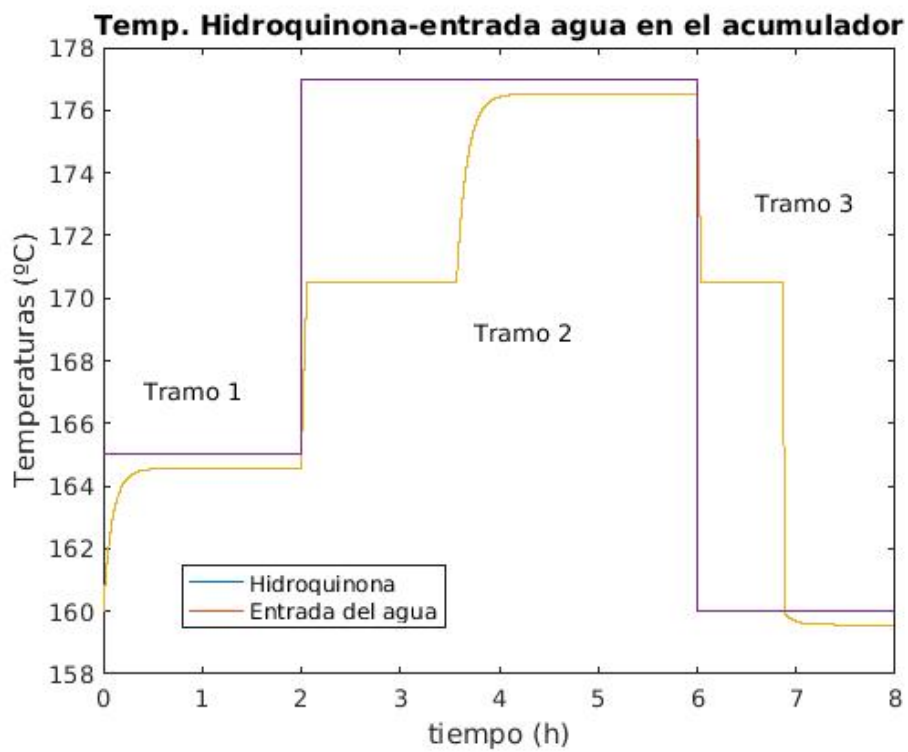
En esta sección se llevará a cabo dos simulaciones distintas con el acumulador de energía. En la primera se busca ver el comportamiento del intercambio de masa de la hidroquinona entre los estados sólido y líquido; y en la segunda se ve el comportamiento de las temperaturas cuando se acopla el acumulador al colector solar modelizado en el Capítulo 2.

#### 3.4.1 Comportamiento de las masas dentro del acumulador de energía

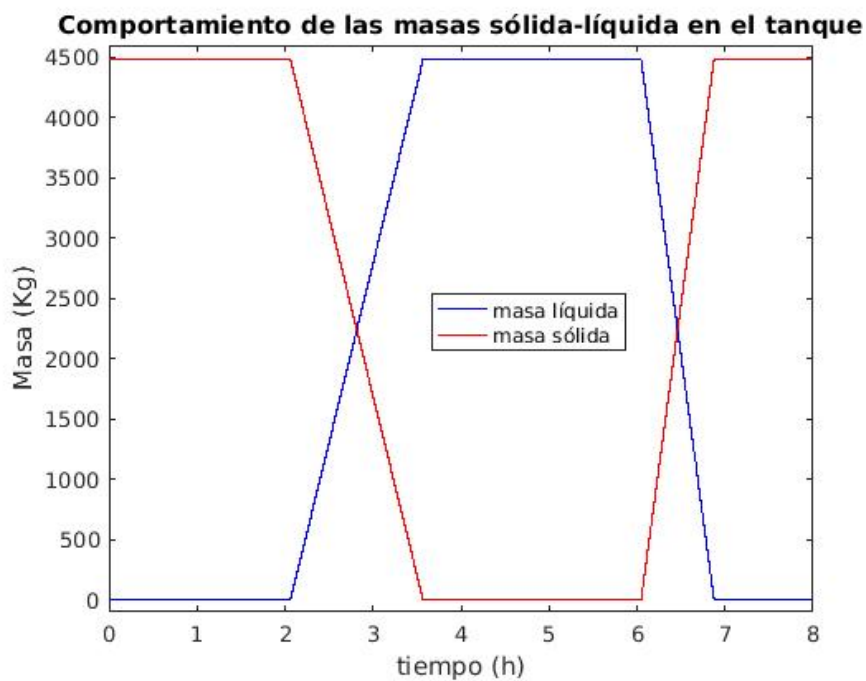
En primer lugar, se realiza una simulación del comportamiento de la hidroquinona con respecto a la temperatura del agua de entrada en el acumulador de energía, de acuerdo a las ecuaciones (3.2)–(3.5) (ver Figuras 3.6 y 3.7). Para ello, se ha considerado una temperatura del agua dentro del acumulador en forma de escalones que nos permite observar de forma clara, la variación tanto de la temperatura de la hidroquinona como el trasvase de masa entre los diferentes estados de ésta.

Del análisis de las figuras se sigue:

- En el tramo 1 (entre 0 y 2 horas) se introduce agua en el acumulador a una temperatura de  $165^\circ C$ , lo que causa que la hidroquinona que se encuentra inicialmente en estado sólido a una temperatura de  $160^\circ C$ , aumente su temperatura hasta estabilizarse en una temperatura algo menor a la del agua. Esto es así ya que no puede ser mayor o igual debido a las pérdidas de calor que sufre el tanque por su superficie exterior. También se observa que la masa de hidroquinona sólida y líquida no cambian, ya que aún no se ha alcanzado la temperatura de fusión.
- Transcurridas dos horas se entra en el tramo 2 donde se aumenta bruscamente la temperatura del agua en unos  $12^\circ C$  hasta alcanzar una temperatura de  $177^\circ C$  y se mantiene a esa temperatura durante cuatro horas. Dicha temperatura es superior a la de fusión de la hidroquinona,  $170.3^\circ C$ . Por tanto, en este periodo de tiempo hay que considerar tres subtramos distintos.
  - El primer subtramo (T2.1) dura muy poco y en él, la hidroquinona en estado sólido aumenta también bruscamente su temperatura debido a la transferencia del agua sobrecalentada hasta que llega a alcanzar la temperatura de fusión ( $170.3^\circ C$ ).
  - El segundo subtramo (T2.2) dura aproximadamente una hora y media. En este tramo, la hidroquinona se empieza a fundir y volverse líquida, a temperatura constante. Esto provoca una disminución de la masa sólida y a su vez un incremento de la masa líquida, hasta que toda la masa se encuentra en estado líquido.
  - El tercer subtramo (T2.3), el comportamiento de la temperatura de la hidroquinona es similar al seguido en el tramo 1, sólo que la hidroquinona ha cambiado de estado.



**Figura 3.6** Comportamiento de la temperatura de la hidroquinona y la temperatura de entrada del agua en el acumulador de energía.



**Figura 3.7** Comportamiento de las masas de la hidroquinona en sus diferentes estados dentro del acumulador de energía.

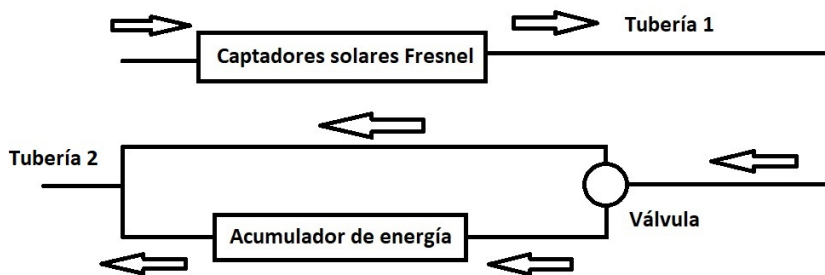
Durante estas primeras seis horas, se ha producido un almacenamiento de energía en el acumulador.

- A partir de la sexta hora se entra en el tramo 3 donde se disminuye la temperatura de entrada del agua en el acumulador hasta los  $160^{\circ}\text{C}$  y se puede observar como la temperatura de la hidroquinona disminuye siguiendo el mismo proceso anterior pero en sentido inverso, pasando la hidroquinona de líquida a sólida siguiendo un proceso similar al dado en los tramos anteriores. Es decir, una vez que esta temperatura vuelve a la temperatura de fusión, la hidroquinona sufre un proceso de solidificación a temperatura constante. El cual provoca que la masa de hidroquinona líquida disminuya y la sólida aumente. Cuando se termina de solidificar, la temperatura sigue disminuyendo hasta aproximarse a la del agua.

Esta etapa es la de cesión de energía del acumulador.

### 3.4.2 Comportamiento de las temperaturas del bloque Captador + Tubería + Acumulador de Energía con datos reales

Una vez simulado y observado un correcto diseño y funcionamiento del acumulador, es hora de unirlos a los captadores de Fresnel mediante tuberías. El diseño que se va a simular puede verse en la Figura 3.8.

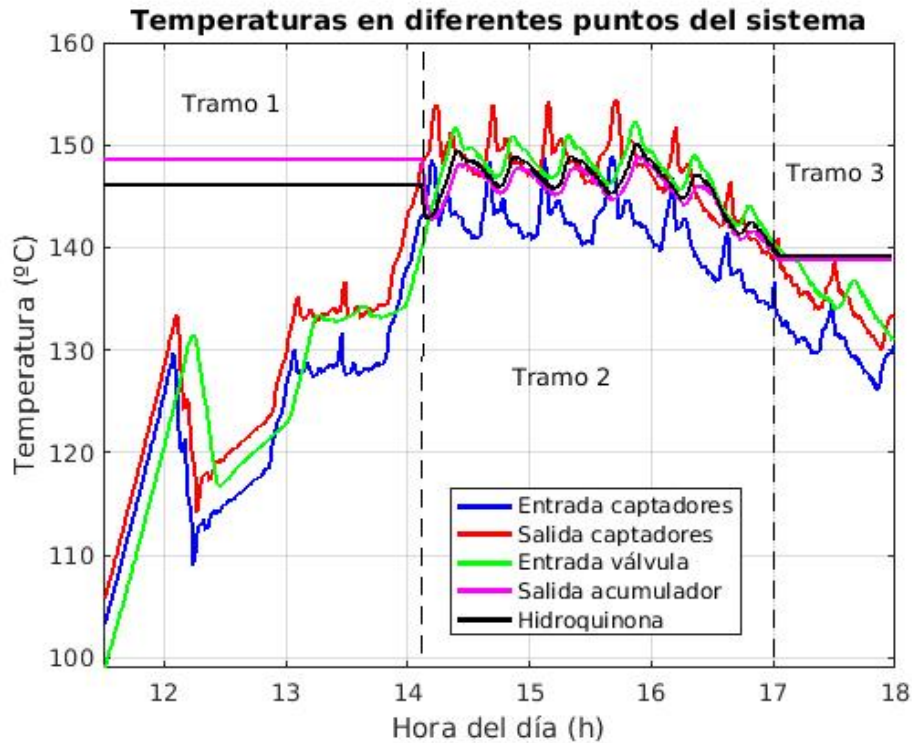


**Figura 3.8** Esquema del bucle Captador-Acumulador en abierto..

Se considerará que las tuberías 1 y 2 tienen aproximadamente 250 y 100 metros de longitud, respectivamente, y en ambas el agua se encuentra a una temperatura inicial de  $155^{\circ}\text{C}$ . Dentro del acumulador, la temperatura inicial de la hidroquinona y del agua serán de  $150^{\circ}\text{C}$  las dos. Entre los captadores solares y el acumulador se incorpora una válvula de tal forma que si la temperatura del agua proveniente de la tubería 1 es inferior a  $140^{\circ}\text{C}$  no se hace pasar por el acumulador y sale al exterior por la tubería 2. Los datos de irradiancia, temperatura ambiente, caudal, etc, serán tomados del fichero que recoge la información del día 17 de agosto de 2009.

La ejecución de la simulación nos proporciona unos resultados respecto a las temperaturas del agua en diferentes puntos del sistema que se muestran en la Figura 3.9. Se debe recordar que la simulación comienza a las 11:00, pero al principio las temperaturas se van estabilizando y por ello se muestra tras media hora de funcionamiento del modelo, que es cuando empieza el modelo de operación de la máquina de absorción, la cual se estudia en el tema siguiente. Ello hace, por ejemplo, que si bien la temperatura del agua y de la hidroquinona inicialmente se considerará a  $150^{\circ}\text{C}$  tras media hora de simulación, éstas se han enfriado por el contacto de la superficie del tanque con el exterior y más la hidroquinona que el agua ya que el agua se encuentra más protegida debido a que circula por el interior del tanque y no tiene contacto directo con la superficie del mismo.

Si se pasa a analizar la Figura 3.9, indicar que las temperaturas de entrada en los captadores (línea azul), salida de los captadores (línea roja) y entrada en la válvula (línea verde) no presentan ninguna



**Figura 3.9** Temperaturas obtenidas con la simulación del bloque captador + acumulador con datos del día 17 de agosto de 2009.

característica relevante que no halla sido comentada en el Capítulo 2. La entrada en la válvula si es nuevo en esta simulación y es interesante ya que se ha simulado de tal forma que si el valor que alcanza la temperatura de agua en ese punto es superior a  $140^{\circ}\text{C}$  se pasa ese agua por el acumulador y en otro caso se enlaza con la tubería 2 que la lleva al exterior.

A continuación se pasa a analizar las temperaturas del agua y de la hidroquinona dentro del acumulador, las cuales se pueden considerar tienen un comportamiento diferente en tres tramos:

**Tramo 1:** Este tramo comienza a las 11:30 y acaba pasado unos minutos después de las 14:00.

En este caso la temperatura en el tanque de acumulación se ha estabilizado de tal forma que apenas disminuyen las temperatura del agua (línea morada) y de la hidroquinona (línea negra) dentro del mismo. En este primer tramo, no hay circulación de agua dentro del tanque ya que la válvula no deja pasar el agua procedente de los captadores ya que ésta no supera los  $140^{\circ}\text{C}$ .

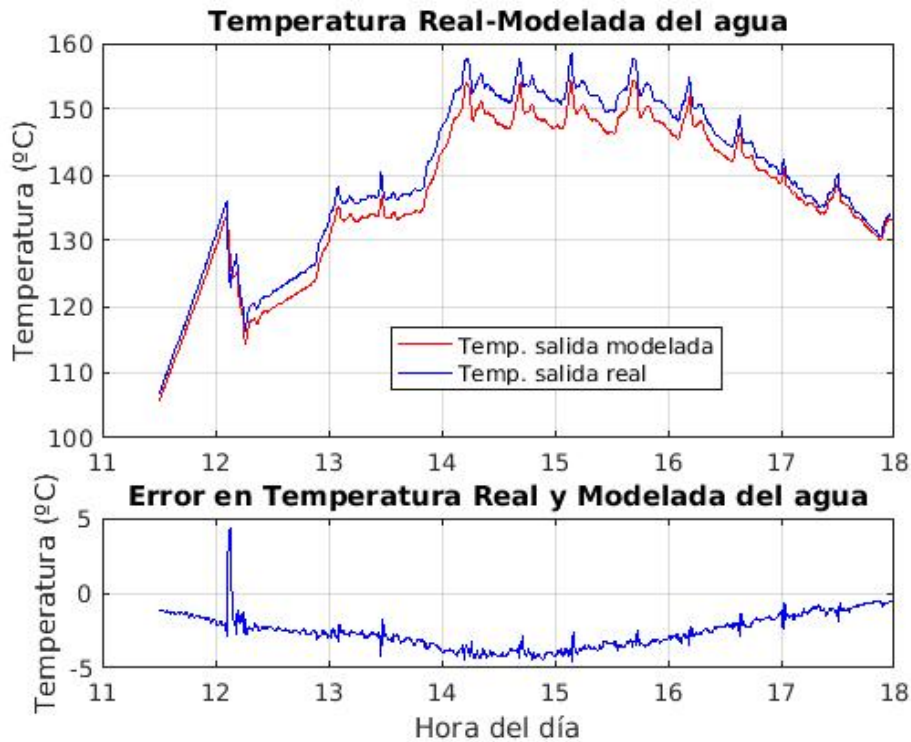
**Tramo 2:** Este tramo comienza pasado unos minutos de las 14:00 hasta poco antes de las 17:00.

En este tramo empieza a circular agua procedente de los captadores por el acumulador ya que el agua está a una temperatura por encima de los  $140^{\circ}\text{C}$  cuando llega a la válvula. Después de unos minutos donde se mezcla el agua estancada del acumulador con el agua de los captadores, las temperaturas se estabilizan y se comportan como se analizó en la sección 3.4.1, es decir, el agua empieza a calentar la hidroquinona pero sin superar la temperatura de fusión de la hidroquinona. Es decir, en este caso la hidroquinona no cambia de estado y se encuentra en todo momento en estado sólido.

**Tramo 3:** Este último tramo comienza poco antes de las 17:00. En este tramo deja de circular agua procedente de los captadores por el acumulador ya que el agua está por debajo de los  $140^{\circ}\text{C}$ . Después de unos minutos donde el agua estancada del acumulador se estabiliza, las temperaturas se estabilizan y se comportan como se analizó en el Tramo 1. Si bien en la figura no se ve, pero tras el paso del tiempo habría una mayor diferencia entre la temperatura de la

hidroquinona y la temperatura del agua dentro del acumulador debido a la pérdida de calor del tanque por su superficie exterior.

Esta nueva simulación con datos reales de un día diferente al simulado en el Capítulo 2 nos permite nuevamente llevar a cabo un estudio de los errores de la modelización dentro de los captadores. Así, en la Figura 3.10 se muestra la temperatura real proporcionada por los sensores de temperatura en los captadores y la temperatura modelizada además del error cometido por la modelización.



**Figura 3.10** Comparativa gráfica entre la temperatura real y la temperatura modelada del agua en la salida de los captadores solares del día 17 de agosto de 2009.

En dicha figura se observa que el modelo replica bien el comportamiento real, sin embargo, se observa que en general proporciona un valor menor al real al igual que ocurría con el día 29 de junio de 2009.

Para finalizar este capítulo se muestra la Tabla 3.5 con el valor de los indicadores de calidad de la

**Tabla 3.5** Indicadores de calidad del error en dos días diferentes.

Indicador	Día del año	
	17/08/2019	29/06/2019
Error Medio	-2.58	-3.73
Raiz Error Cuadrático Medio	2.81	3.84
Error Absoluto Medio	2.61	3.73
Error Absoluto Porcentual Medio (%)	1.84	2.36

aproximación junto a los obtenidos en el Capítulo 2 para un día diferente. En dicha tabla se puede ver que el *EAPM* es 1.84%, es decir, el error relativo medio no supera un 2%, y al igual que se dijo en el capítulo anterior, creemos que resulta aceptable aunque mejorable en el futuro.





## 4 Máquina de Absorción

---

En este capítulo se realiza un estudio de las máquinas de absorción. En particular, se presenta y analiza la máquina que se encuentra ubicada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Para ello, primero se indica su funcionamiento general y se describen sus componentes [?, ?]. A continuación, se realiza su diseño e implementación. Finalmente se lleva a cabo unas simulaciones y se analizan los resultados obtenidos cuando se considera una planta simplificada: captador solar de Fresnel y máquina de absorción.

### 4.1 Funcionamiento y Descripción

Una máquina de absorción es un mecanismo que puede producir frío a partir de una fuente de calor y permite usar la energía solar térmica para refrigerar un determinado espacio. Esto se consigue ya que dentro de la máquina se produce un proceso de absorción de energía, el cuál consiste en poner en contacto un gas con un líquido para que éste disuelva determinadas componentes del gas formando una solución, produciéndose así una transferencia de materia. Las máquinas de absorción más usada hacen uso del bromuro de litio como gas y toman el agua como agentes refrigerantes.

Una máquina de absorción se puede clasificar según se considere:

**Número de efectos:** Indica el número de generadores que posee la máquina de absorción

- Simple efecto: con un solo generador.
- Doble efecto: con dos generadores.
- Triple efecto: con tres generadores.

**Número de etapas:** Indica el número de absorbedores que posee la máquina de absorción

- Simple etapa: con un absorbedor.
- Doble etapa: con dos absorbedores.
- Triple etapa: con tres absorbedores.

**Fuente de calor:** Empleada en el funcionamiento de la maquina.

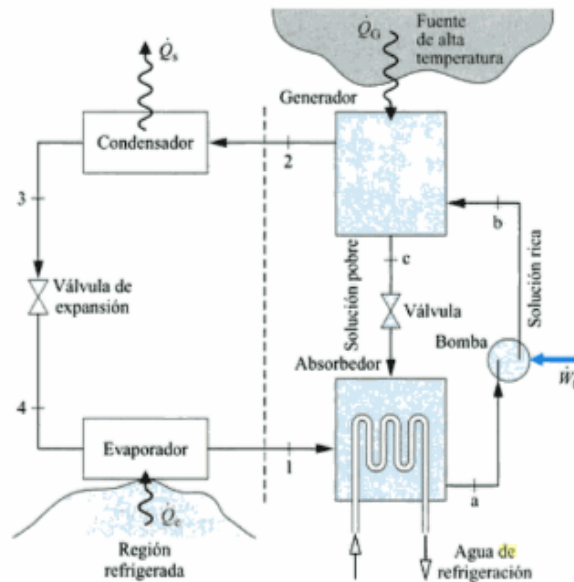
- Tipo directo o “llama directa”: la potencia calorífica proviene de la combustión de fuentes de energía fósiles (líquidas o gaseosas).
- Tipo indirecto: la potencia calorífica proviene de la transferencia de calor entre dos fluidos a través de un intercambiador.

**Sistema de condensación:** Puede ser de dos tipos

- Por agua.

- Por aire.

Los componentes de una máquina de absorción “ideal” son los siguientes: generador, condensador, evaporador, absorbedor, válvula de expansión, válvula de estrangulamiento y bomba de disolución. En la Figura 4.1 se muestra un esquema intuitivo de estas componentes así como su misión dentro de la máquina.



**Figura 4.1** Esquema visual de los componentes de una máquina de absorción ideal.

Siguiendo el esquema dado en la figura, se distinguen dos zonas de trabajo, la de alta presión formada por el generador y el condensador, y la de baja presión formada por el evaporador y el absorbedor. Ambas zonas de trabajo están separadas por la válvula de expansión. A su vez se distinguen también dos ciclos: el ciclo del refrigerante y el ciclo de la disolución. A continuación, se detallan ambos ciclos y para ello se hará uso del esquema presentado en la Figura 4.2:

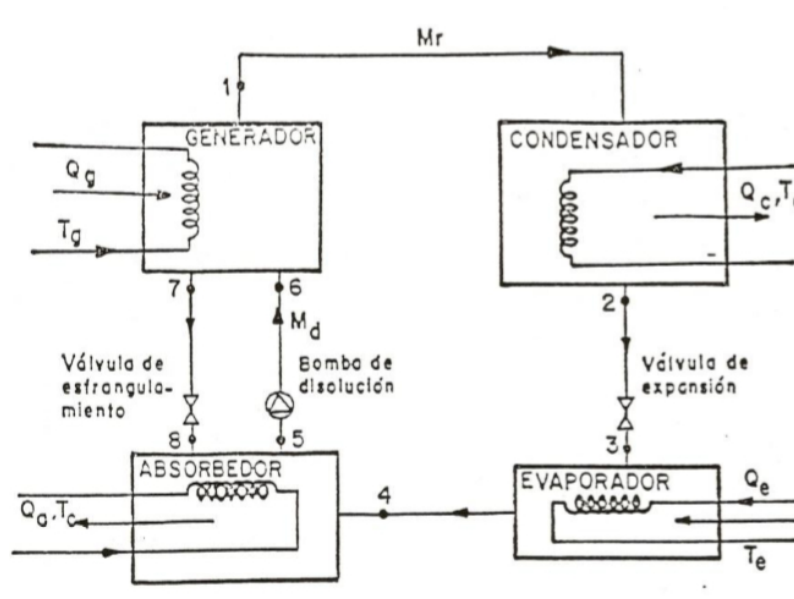
**Ciclo del refrigerante:** En el generador se suministra una fuente de calor  $Q_g$  a una temperatura  $T_g$ , esto provoca que el refrigerante que se encuentra en él, se evapore, se separe de la solución y circule a través de una tubería (punto 1) hasta el condensador.

El vapor del refrigerante llega al condensador a temperatura  $T_g$  y presión  $P_c$ , donde se condensa hasta alcanzar la misma presión  $P_c$  y a temperatura de  $T_c$ , menor que  $T_g$  debido a la cesión de calor  $Q_c$ , lo que conlleva que el vapor de refrigerante vuelve a estado líquido y circule por otra tubería hasta una válvula de expansión (punto 2).

En dicha válvula de expansión, el líquido refrigerante se expansiona a entalpía constante, donde se transforma parcialmente en vapor, alcanzando una presión  $P_e$  y temperatura  $T_e$  (punto 3).

A continuación, viaja al evaporador en donde hierve debido a una pequeña inyección de calor  $Q_e$  en las mismas condiciones que el punto 3, es decir, a presión  $P_e$  y temperatura  $T_e$ . Tras esto el vapor del refrigerante se traslada al absorbedor (punto 4).

El absorbedor, recibe el vapor y se produce la absorción del refrigerante con el absorbente a presión  $P_e$  y temperatura  $T_a$ . Tanto el absorbedor como el condensador transfieren calor  $Q_c$  al ambiente por lo que  $T_a = T_c$ .



**Figura 4.2** Esquema de funcionamiento de una máquina de absorción “ideal”.

**Ciclo de la disolución:** Una vez evaporado el refrigerante en el generador, la disolución se separa y sale del generador a través de una tubería por el punto 7 a presión  $P_g$  y temperatura  $T_g$ . Luego atraviesa una válvula de estrangulamiento hasta que su presión llega a  $P_e$ , con temperatura  $T_g$  y llega al absorbedor a través de la tubería por el punto 8. Dentro del absorbedor la disolución se mezcla con el refrigerante proveniente del evaporador.

A continuación, la mezcla es bombeada de vuelta al generador (puntos 5 y 6) a temperatura y presión  $T_g$  y  $P_g$ , respectivamente.

Para la planta de energía solar que se va a modelizar se hace uso de las características de una máquina de absorción de doble efecto BROAD-BZH 15, en concreto la máquina que se muestra en la Figura 4.3. La disolución con la que funciona dicha máquina es LiBr-Agua y los parámetros nominales se recogen en la Tabla 4.1.



**Figura 4.3** Máquina de Absorción de la ETSI de la Universidad de Sevilla. Máquina de doble efecto con ciclo LiBr/agua, modelo BROAD-BZH15 fabricado en China.

Este tipo de máquina de absorción presenta una estructura más compleja que una máquina “ideal” ya que se compone de dos generadores, uno de alta (GA) y otro de baja temperatura (GB), dos recuperadores de calor (RA y RB), un condensador (COND), un subenfriador de líquido (SUB), un evaporador (EVAP), un absorbedor (ABS), una bomba (B) y válvulas de expansión. Todo lo anterior

Tabla 4.1 Parámetros nominales de la máquina de absorción BROAD-BZH 15.

Conceptos	Valores	Unidades
Potencia Frigorífica Nominal	174	KW
Coefficiente de Rendimiento (COP) Refrigeración	1.34	–
Potencia Calorífica Nominal	135	KW
COP Calefacción	0.925	–
Temperatura de entrada al evaporador	12	°C
Temperatura de salida del evaporador	7	°C
Caudal del evaporador	8.3	L/s
Temperatura de entrada al condensador	30	°C
Temperatura de salida del condensador	37	°C
Caudal del condensador	10.28	L/s
Temperatura del generador de alta (HTG)	145	°C
Modo de operación	Agua sobrecalentada y/o Gas	

se puede apreciar en la Figura 4.4, donde el modo de distribución del caudal de la disolución

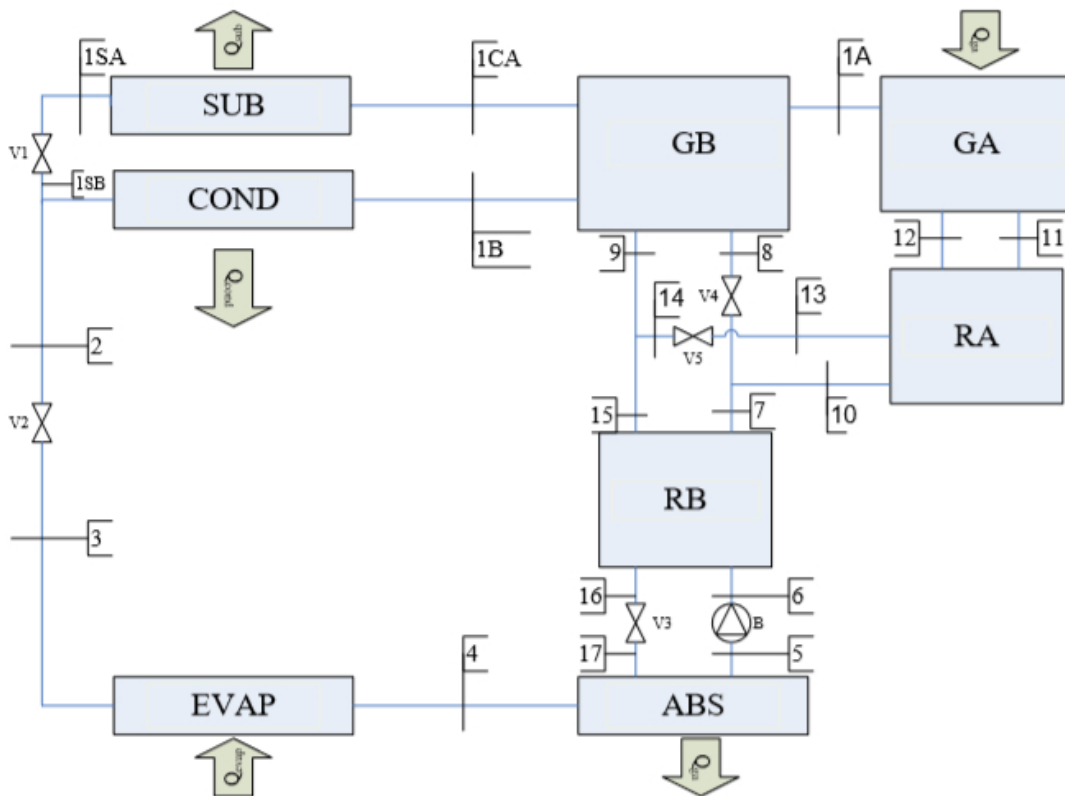


Figura 4.4 Esquema de los componentes de una máquina de absorción de doble efecto.

procedente del absorbedor es de tipo paralelo, es decir, se suministra el mismo caudal de disolución tanto al generador de alta como al de baja. La razón del uso de este tipo de configuración es debido a que desarrolla un mayor coeficiente de rendimiento<sup>1</sup> (COP), ya que esta distribución proporciona

<sup>1</sup> Las máquinas de absorción de simple efecto trabajan con temperaturas en el generador de 60 – 90°C, alcanzando valores típicos de COP en torno a 0.6 frente a las máquinas de doble efecto que requieren temperaturas en el generador de 120 – 140°C para alcanzar valores de COP de 1.3.

mejores condiciones termodinámicas que el flujo en serie.

En este tipo de máquina de absorción, al igual que ocurre en la máquina ideal de absorción, se distinguen dos ciclos: ciclo del refrigerante y ciclo de la disolución:

**Ciclo del refrigerante:** En primer lugar, se suministra una fuente de calor  $Q_{ga}$  al generador de alta (GA) hasta alcanzar una temperatura  $T_{ga}$ , tras lo cual el refrigerante que se encuentra en él, se evapora, se separa de la disolución y se transmite al generador de baja (GB) a través de una tubería (punto 1A).

Una parte del vapor del refrigerante a temperatura  $T_{ga}$  y presión  $P_{ga}$  atraviesa el generador de baja (GB), condensándose a temperatura  $T_{1CA}$  y presión  $T_{ga}$ , viajando al subenfriador (punto 1CA).

En el subenfriador se produce una cesión de calor  $Q_{sub}$  que disminuye la temperatura del refrigerante hasta  $T_{1SA}$  (1SA) y posteriormente se expansiona a entalpía constante en la válvula de expansión (V1), alcanzando la presión  $P_c$ , temperatura  $T_2$  y convirtiéndose a estado líquido (punto 1SB) hasta unirse a la corriente de refrigerante procedente del condensador con las condiciones de presión  $P_c$  y temperatura  $T_2$ .

Recordemos que una parte del vapor del refrigerante atravesaba el generador de baja (GB), el resto de vapor se vuelve a separa de la disolución restante a una presión  $P_c$  y temperatura  $T_{1B}$  (punto 1B). Este vapor restante entra en el condensador (COND) donde disminuye su temperatura a  $T_{1SB}$  ya que pierde un calor  $Q_{cond}$  volviendo al estado líquido. Finalmente se une al vapor a la salida de la válvula de expansión (V1) en el punto 2.

A continuación, el refrigerante líquido se expansiona isoentálpicamente a través de otra válvula de expansión (V2) hasta alcanzar la presión del evaporador  $P_e$  y la temperatura  $T_3$  (punto 3). Luego es conducido hasta el evaporador.

En el evaporador, el refrigerante líquido se evapora gracias a una inyección de calor  $Q_{evap}$  alcanzando una presión y temperatura de  $P_e$  y  $T_4$ , respectivamente en el punto 4.

Este nuevo vapor de refrigerante es conducido al absorbedor (ABS) donde cede un calor  $Q_{ga}$  que lo vuelve líquido de nuevo para mezclarse con la disolución existente en él.

**Ciclo de la disolución:** La disolución sale del absorbedor (ABS) a presión  $P_e$  y temperatura  $T_5$  (punto 5), donde es bombeada por una bomba (B) hasta alcanzar la presión del generador de alta, o sea  $P_{ga}$  en el punto 6.

A continuación, atraviesa el recuperador de baja (RB) a presión  $P_{ga}$  para aumentar su temperatura hasta  $T_7$  en el punto 7.

A partir de aquí la disolución se separa y una corriente se dirige al generador de baja (punto 8) mientras que la otra se dirige al generador de alta (punto 10).

La disolución que se dirige al generador de baja (GB) se expansiona isoentálpicamente gracias a la válvula V4, para alcanzar la presión del condensador  $P_c$  y temperatura  $T_8$  (punto 8).

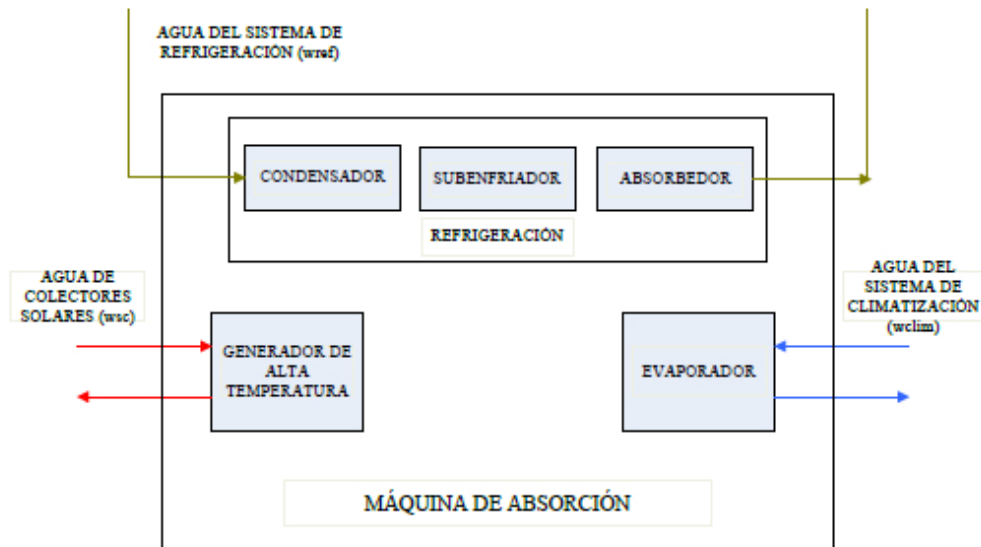
Una vez entra en el generador de baja sale de él con una presión  $P_c$  y temperatura  $T_9$  (punto 9) para unirse a la corriente procedente del generador de alta.

La corriente que es conducida al generador de alta (GA) es precalentada en el recuperador de alta (RA) incrementándose la temperatura hasta  $T_{11}$  (punto 11), luego absorbe el calor procedente de la fuente de calor  $Q_{ga}$  y sale del generador de alta (GA) a una presión  $P_{ga}$  y temperatura  $T_{12}$  (punto 12), pasa por el recuperador de alta disminuyendo su temperatura hasta  $T_{13}$  (punto 13) y se expansiona isoentálpicamente en la válvula de expansión V5 llegando a unas condiciones de presión  $P_c$  y temperatura  $T_9$  (punto 14) para converger con la corriente procedente del generador de baja (GB).

Una vez unidas ambas corrientes con presión  $P_c$  y temperatura  $T_9$  (punto 15), se reduce su temperatura hasta  $T_{16}$  (punto 16) debido a que cede su calor en el recuperador de baja (RB) y se expansionan isoentálpicamente en la válvula de expansión V3 retornando al absorbedor a presión  $P_e$  y temperatura  $T_{17}$  (punto 17).

## 4.2 Diseño e Implementación

La máquina de absorción se va a implementar como un modelo formado por 3 submodelos tipo caja gris<sup>2</sup>: un generador de alta temperatura, un refrigerador y un evaporador, como se muestra en la Figura 4.5.



**Figura 4.5** Esquema del diseño de implementación de la máquina de absorción.

Indicar que, dado que se desconocen parámetros geométricos y áreas en la máquina de absorción, se han identificado algunos parámetros usando datos reales. En concreto: el coeficiente de pérdidas térmicas al ambiente, el coeficiente de transmisión de calor por el área de transmisión, y la capacidad térmica de cada elemento de la máquina de absorción.

Como se observa en la Figura 4.5, para la modelización, hay tres entradas de agua procedentes de diferentes parte de una planta:

- El agua procedente de los colectores solares de Fresnel que se encarga de alimentar el generador de alta, dando lugar al comienzo del ciclo de absorción (inicio de operación). En otras palabras, el agua de los colectores es la fuente de alta energía que alimenta al generador (ver Figura 4.1).
- El agua del sistema de refrigeración, la cual disipa la potencia térmica producida por el condensador de la máquina.
- El agua del sistema de climatización que es enfriada por el evaporador consiguiendo el efecto útil del equipo de absorción.

<sup>2</sup> La diferencia entre lo más conocido que es un modelo de caja negra y un modelo de caja gris es que, aunque en ambos se identifican parámetros, el modelo de caja gris está basado en ecuaciones de balance conocidas, mientras que los modelos de caja negra no. Además algunos parámetros son estimados usando datos reales en el modelo tipo caja gris.

Las hipótesis a tener en cuenta para el desarrollo del modelo son las siguientes:

- No existe intercambio de potencia.
- Se desprecia la energía cinética y potencial respecto a la energía interna.
- Pérdidas de carga en conductos y tuberías despreciables.
- El agua es considerada como líquido incompresible caloríficamente perfecto.
- Los sistemas de generador de media temperatura, del sistema de refrigeración y del evaporador, son considerados como una masa puntual con una capacidad calorífica constante.

En lo que sigue se analiza cada una de las ecuaciones de cada modelo caja gris:

#### 4.2.1 Generador de Alta Temperatura

El generador de alta temperatura se modeliza, a partir del primer principio de la termodinámica, con las siguientes ecuaciones:

- El modelo de la temperatura de la solución (Agua-Bromuro de Litio). A esta temperatura se la denota por  $T_{HTG}$ , donde las iniciales se corresponden con High Temperature Generator, y su ecuación diferencial es

$$C_{HTG} \frac{\partial T_{HTG}}{\partial t} = Q_{cald} + hA \cdot (T_{entagua} - T_{HTG}) - Q_{losses} \quad (4.1)$$

donde

$$Q_{losses} = a1_{THTG} \cdot (T_{HTG} - T_a) + a2_{THTG}$$

y

$$hA = 400 \cdot q_{water}^{0.8} \cdot T_{entagua}$$

- La temperatura de salida de agua del generador de alta,  $T_{outagua}$ , que vuelve al captador solar se puede calcular sabiendo el calor cedido a la solución según la ecuación diferencial:

$$C_{TOUT} \frac{\partial T_{outagua}}{\partial t} = -hA \cdot (T_{entagua} - T_{HTG}) - Q_{losses} - q_{water} \cdot C_w \rho_{agua} \cdot (T_{outagua} - T_{entagua}) \quad (4.2)$$

donde

$$Q_{losses} = a1_{TOUT} \cdot \left( \frac{T_{entagua} - T_{outagua}}{2} - T_a \right) + a2_{TOUT}$$

y

$$C_{TOUT} = 0.4 \cdot C_w \cdot \rho_{agua}$$

Las variables y parámetros de las ecuaciones (4.1)-(4.2) pueden verse en las Tablas 4.2 y 4.3.

#### 4.2.2 Evaporador

El sistema de evaporación se encarga de enfriar el agua que le llega, ya que contiene un fluido refrigerante a baja presión que hierve y por lo tanto extrae calor del agua y la enfría.

Su ecuación diferencial de balance (primer principio de la termodinámica) es:

$$C_{evap} \frac{\partial T_{outevap}}{\partial t} = -Q_{evap} - Q_{loss} - q_{evap} \cdot C_w \rho_w \cdot (T_{outevap} - T_{entevap}) \quad (4.3)$$

donde

$$Q_{loss} = a1_{evap} \cdot \left( \frac{T_{entevap} - T_{outevap}}{2} - T_a \right) + a2_{evap}$$

Tabla 4.2 Variables del generador de alta en la máquina de absorción.

Notación	Significado	Variable	Unidades
$T_{HTG}$	Temperatura de la solución	Salida	$^{\circ}C$
$T_{entagua}$	Temperatura de entrada del agua	Entrada	$^{\circ}C$
$T_a$	Temperatura ambiente	Datos reales	$^{\circ}C$
$T_{outagua}$	Temperatura de salida del agua	Salida	$^{\circ}C$
$q_{water}$	Caudal de agua	Datos reales	$L/s$
$Q_{cald}$	Potencia cedida por la caldera de gas natural	Datos reales	$W$
$hA$	Coefficiente de transmisión de calor por convección ( $h$ ) y área del sistema ( $A$ )	Auxiliar	$W/^{\circ}C$
$C_w$	Calor específico del agua	Auxiliar	$J/Kg^{\circ}C$
$\rho_{agua}$	Densidad del agua	Auxiliar	$Kg/m^3$

Tabla 4.3 Parámetros del generador de alta en la máquina de absorción.

Notación	Significado	Valor	Unidades
$a1_{THTG}$	Coefficiente de pérdidas 1 para la solución	431.1	–
$a2_{THTG}$	Coefficiente de pérdidas 2 para la solución	–18028.5	–
$a1_{TOUT}$	Coefficiente de pérdidas 1 para el agua de salida	455	–
$a2_{TOUT}$	Coefficiente de pérdidas 2 para el agua de salida	–9000	–

y

$$Q_{evap} = C_p \cdot Q_{genalta} = C_p \cdot (hA \cdot (T_{entagua} - T_{agua}) + Q_{cald}).$$

En la modelización, dado que el evaporador está a temperatura bastante baja y bien aislado, se puede considerar que sus pérdidas son nulas o muy pequeñas ( $Q_{loss} = 0$  y de aquí  $a1_{evap} = a2_{evap} = 0$ ). De hecho, al estar a temperatura inferior al ambiente, ganaría temperatura. Por tanto, la ecuación diferencial que se ha considerado es:

$$C_{evap} \frac{\partial T_{outevap}}{\partial t} = -Q_{evap} - q_{evap} \cdot C_w \rho_w \cdot (T_{outevap} - T_{entevap}). \quad (4.4)$$

Las variables y parámetros de esta ecuación (4.4) pueden verse en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Variables y parámetros del evaporador en la máquina de absorción.

Notación	Significado	Tipo o Valores	Unidades
$T_{agua}$	Temperatura del agua en la máquina	Variable de entrada	$^{\circ}C$
$T_{entevap}$	Temperatura del agua a la entrada del evaporador	Variable de entrada	$^{\circ}C$
$T_{outevap}$	Temperatura del agua a la salida del evaporador	Variable de salida	$^{\circ}C$
$q_{evap}$	Caudal de agua en el evaporador	Datos reales	$L/s$
$\rho_w$	Densidad del agua	Variable auxiliar	$Kg/m^3$
$C_{evap}$	Capacidad térmica del agua en el evaporador	$1.65 \cdot 10^8$	$J/^{\circ}C$
$C_p$	Coefficiente de pérdidas 1 para la solución	1.34	–

### 4.2.3 Refrigerador

El sistema de refrigeración, está compuesto por varios subsistemas: el condensador, subenfriador y absorbedor, todos en uno. No tenemos datos de estos sistemas intermedios y, por lo tanto, no podemos modelar cada subsistema por separado. Aunque por cada uno de ellos circula el caudal



de agua de refrigeración. El condensador absorbe calor del generador de alta y el absorbedor del evaporador.

Su ecuación de balance (primer principio de la termodinámica) es:

$$C_{refrig} \frac{\partial T_{outrefrig}}{\partial t} = -Q_{refrig} - Q_{loss} - q_{refrig} \cdot C_w \rho_w \cdot (T_{outrefrig} - T_{entrefrig}) \quad (4.5)$$

donde

$$Q_{loss} = a1_{refrig} \cdot \left( \frac{T_{entrefrig} - T_{outrefrig}}{2} - T_a \right) + a2_{refrig},$$

$$C_{refrig} = 0.4 \cdot C_w \cdot \rho_w$$

y

$$Q_{refrig} = Q_{evap} + Q_{genalta} = (1 + C_p) \cdot (hA \cdot (T_{entagua} - T_{agua}) + Q_{cald})$$

Este sistema disipa el calor que se absorbe en el evaporador y en el generador de alta. De aquí que se supone  $Q_{loss} = 0$  y entonces  $a1_{refrig} = a2_{refrig} = 0$ , y la ecuación a modelizar es:

$$C_{refrig} \frac{\partial T_{outrefrig}}{\partial t} = -Q_{refrig} - q_{refrig} \cdot C_w \rho_w \cdot (T_{outrefrig} - T_{entrefrig}) \quad (4.6)$$

Las variables de la ecuación pueden verse en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Variables del refrigerador en la máquina de absorción.

Notación	Significado	Variable	Unidades
$T_{entrefrig}$	Temperatura del agua a la entrada del refrigerador	Entrada	$^{\circ}C$
$T_{outrefrig}$	Temperatura del agua a la salida del refrigerador	Salida	$^{\circ}C$
$q_{refrig}$	Caudal de agua en el refrigerador	Datos reales	$L/s$
$C_{refrig}$	Capacidad térmica del refrigerante	Auxiliar	$J/^{\circ}C$

### 4.3 Simulación y Resultados

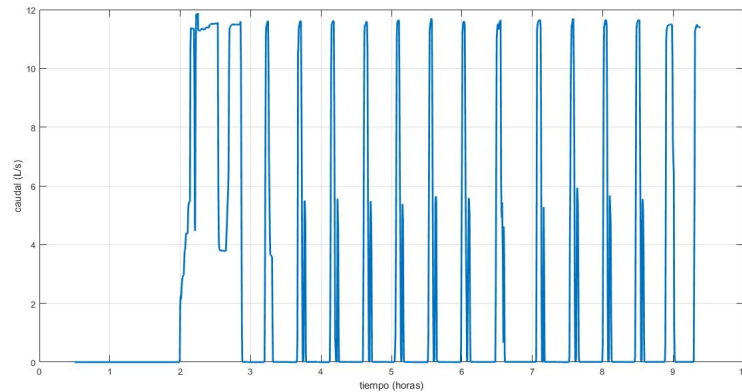
En esta sección se llevará a cabo dos simulaciones distintas con la máquina de absorción. En la primera se busca ver el comportamiento de cada componente de la máquina de absorción de forma independiente; y en la segunda se ve el comportamiento de las temperaturas cuando se acopla la máquina de absorción al colector solar modelizado en el Capítulo 2.

#### 4.3.1 Comportamiento individualizado de cada una de las componentes de la Máquina de Absorción

En primer lugar, se realiza una simulación del comportamiento de cada una de las diferentes componentes de la máquina de absorción con respecto a la temperatura del agua de entrada, de acuerdo a la ecuación (4.2) para el generador de alta, la ecuación (4.4) para el evaporador y la ecuación (4.6) para el refrigerador.

Para la simulación se ha considerado una inyección intermitente del caudal de agua ( $q_{water}$ ) a partir de la segunda hora de funcionamiento de la máquina de absorción como se puede ver en la Figura 4.6.

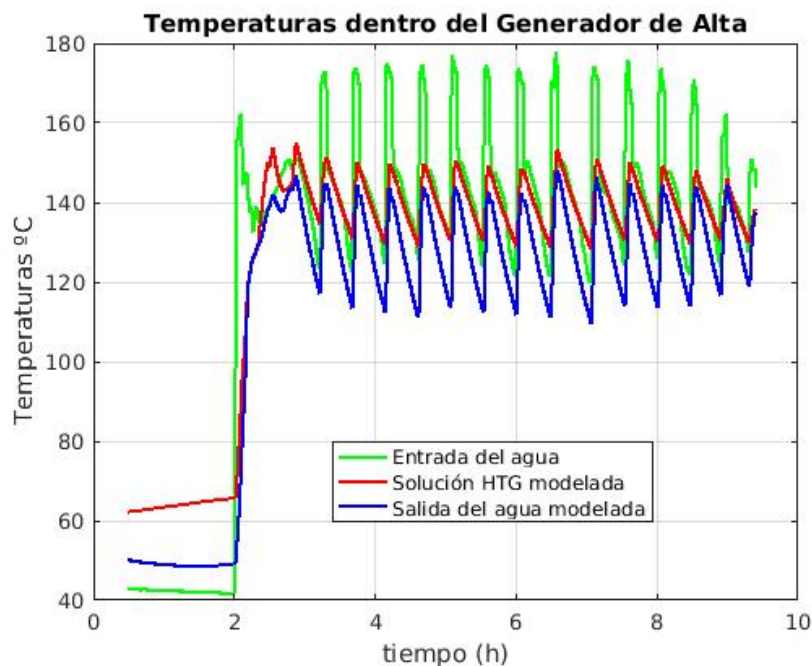
Además se han utilizado un conjunto de datos reales obtenidos de los sensores de la máquina de absorción de la ETSI que se encuentran recogidos en el fichero “DATOSABSORCION.m”.



**Figura 4.6** Inyección de agua con diferentes caudales en el Generador de Alta.

### Generador de alta

Se comienza con el generador de alta, para el cual la simulación proporciona las diferentes temperaturas que se muestran junto a sus temperaturas reales<sup>3</sup> en la Figura 4.7. De la figura se sigue:



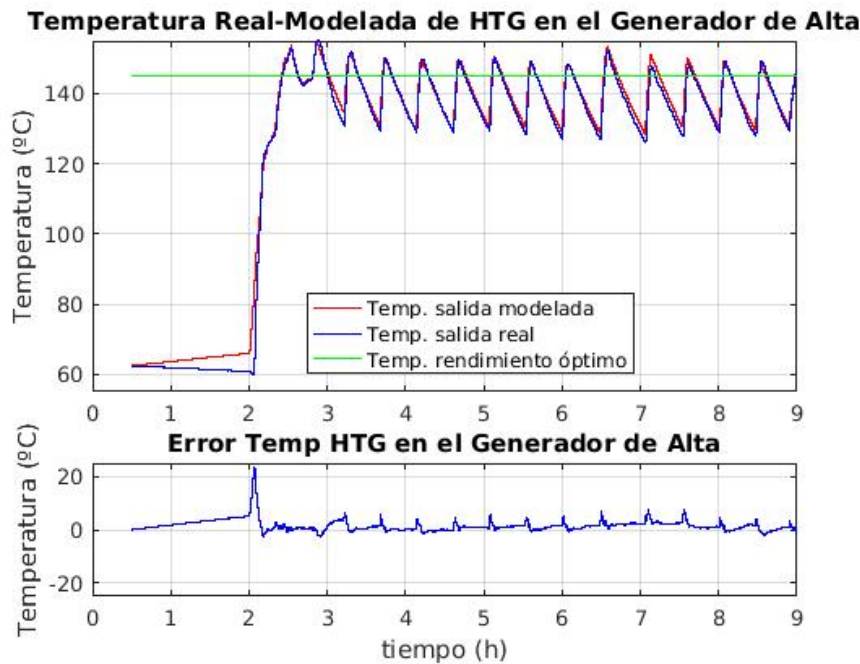
**Figura 4.7** Temperaturas dentro del Generador de Alta obtenida de una simulación.

- Se observa en primer lugar que la temperatura del agua a la entrada de la máquina proveniente de los captadores solares (línea verde), sufre unos aumentos y disminuciones intermitentes debido entre otras cosas a las variaciones de caudal de agua. Eso es así, ya que a mayor caudal, menor es el tiempo que tarda el agua en recorrer la tubería (se sigue de la ecuación (2.6)) y por ello menor será la pérdida de calor.
- Por este mismo motivo, las otras temperaturas presentan similares comportamientos.

<sup>3</sup> Obtenidas por un sensor.

- Puesto que el generador de alta absorbe energía, las temperaturas de la solución y del agua deben ser menores que la temperatura de entrada como así ocurre.

Con objeto de contrastar las diferencias entre la realidad y la modelización se ha seguido el mismo tratamiento que se llevó a cabo con los captadores solares. Así se obtenido las Figuras 4.8 y 4.9 para las temperaturas HTG y del agua a la salida del generador, respectivamente.



**Figura 4.8** Temperaturas real y modelada del HTG dentro del Generador de Alta. Gráfica de los errores.

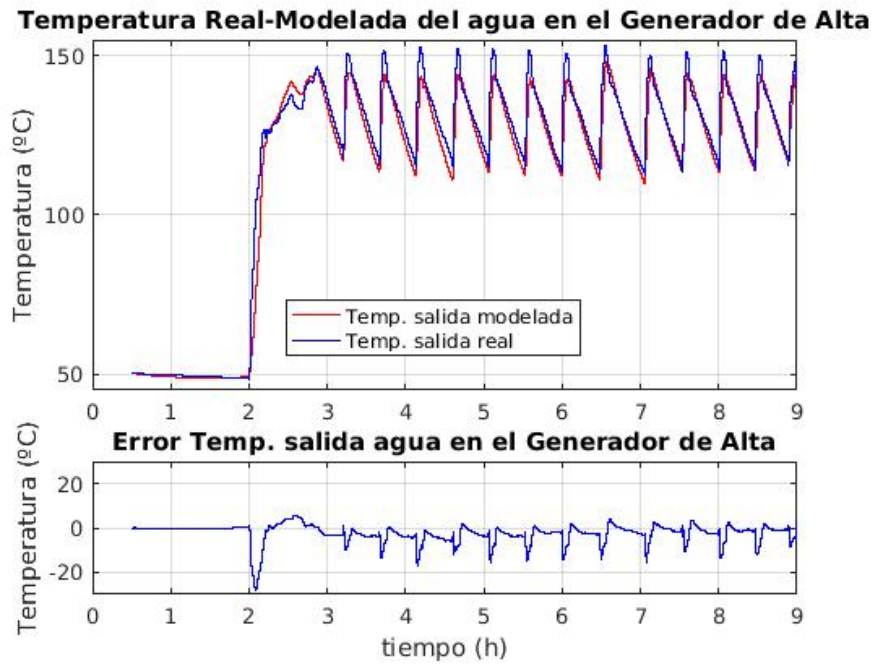
Lo más resaltable de las figuras anteriores es que el modelo sobrestima ligeramente la temperatura de HTG y, por consiguiente, infravalora la temperatura de salida del agua del generador. Se muestra en la parte superior de la Figura 4.8 una línea en verde que muestra el valor de la temperatura HTG que proporciona el funcionamiento óptimo ( $145^{\circ}\text{C}$ ) y se observa como inicialmente se aporta energía hasta alcanzar esta temperatura y se regula para mantenerla constante.

Los correspondientes valores de los indicadores se muestran en la Tabla 4.6 y se observa que el error entre la realidad y la modelización no supera por término medio en ninguno de los dos casos el 2.5%, lo que puede ser considerado una buena aproximación.

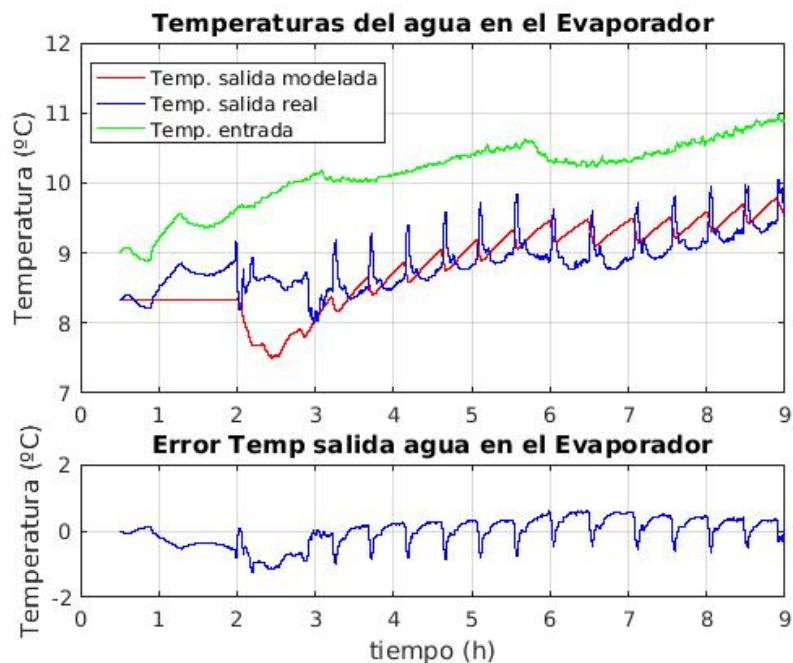
### Evaporador

Con respecto al evaporador se lleva a cabo una nueva simulación con los mismos datos y configuración utilizados para el Generador de Alta. En este caso se ha obtenido la Figura 4.10 y se observa en la figura una mayor diferencia entre las temperaturas del agua a la salida proporcionada por el modelo y la real, pero hay que tener en cuenta la escala en las temperaturas. Para ello, se debe mirar la Tabla 4.6 y se llega a conclusiones similares a las ya obtenidas anteriormente. En este caso el error absoluto porcentual medio es el mayor, por tanto el peor, que se ha obtenido con todas las simulaciones presentadas en este trabajo.

Se observa como el comportamiento del agua en el modelo es más suave que el real, algo que suele ser habitual por la propia construcción de los modelos.



**Figura 4.9** Temperaturas real y modelada del agua en la salida del Generador de Alta. Gráfica de los errores.



**Figura 4.10** Temperaturas real y modelada del agua en el Evaporador. Gráfica de los errores.

### Refrigerador

Con respecto al refrigerador se lleva a cabo una nueva simulación con los mismos datos y configuración utilizados para el Generador de Alta y el Evaporador y se ha obtenido la Figura 4.11. En esta figura se observa un comportamiento similar entre las temperaturas del agua a la salida proporcionada por el modelo y la real con lo que podemos concluir que el modelo se aproxima suficientemente bien a la realidad, aunque tiende a dar una temperatura de salida de agua ligeramente

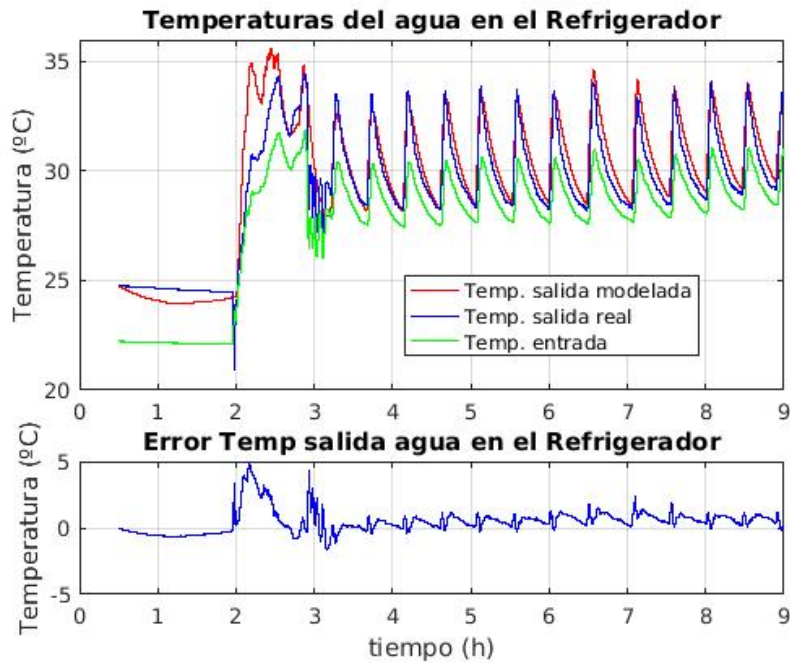


Figura 4.11 Temperaturas real y modelada del agua en el Refrigerador. Gráfica de los errores.

mayor que la real. Sus correspondientes indicadores de bondad se siguen en la Tabla 4.6 con un *EAPM* del 2.41 %

Tabla 4.6 Errores en la modelización de los componentes de la máquina de absorción.

Indicador	Generador de Alta		Evaporador	Refrigerador
	Agua	HTG	Agua	Agua
Error Medio	-2.35	1.39	-0.03	0.49
Raíz Error Cuadrático Medio	4.85	2.68	0.42	0.99
Error Absoluto Medio	3.03	1.71	0.34	0.71
Error Absoluto Porcentual Medio (%)	2.44	1.79	3.85	2.41

#### 4.3.2 Comportamiento de las temperaturas del bloque Captador + Tubería + Máquina de Absorción con datos reales

Una vez simulado y observado un correcto diseño y funcionamiento de los componentes de la máquina de absorción, es hora de unirla a los captadores solares de Fresnel mediante tuberías. En esta primera sección se considerará en lazo abierto, usando los datos del día 29 de junio de 2009, como se hizo en el Capítulo 3 y tomando los mismos datos proporcionados en el fichero "DATOSABSORCION.m". En estos datos hay variables que coinciden con las dadas para el día considerado. Por ello, se elige la evolución de las temperaturas en los captadores solares del día 29/06/09 y se complementan con los datos del resto de variables de trabajo aportadas en el fichero "DATOSABSORCION.m". Con respecto a la temperatura de entrada en los captadores solares se sigue con los valores de ese día a lo largo de toda la simulación.

El diseño simplificado que se va a simular puede verse en la Figura 4.12, y los resultados de la simulación se pueden ver en la Figura 4.13, la cual se pasa a comentar.

**Tramo 1:** En los primeros instantes de la simulación se observa lo mismo que en anteriores simulaciones, el agua de diferentes zonas del sistema tiene diferentes temperaturas. De modo que, cuando se ponga en marcha el sistema, el agua recorre todo el sistema, mezclando el

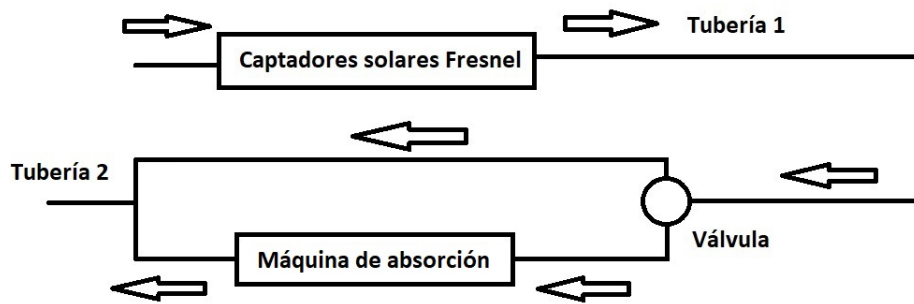


Figura 4.12 Esquema del Captador-Máquina de Absorción en abierto.

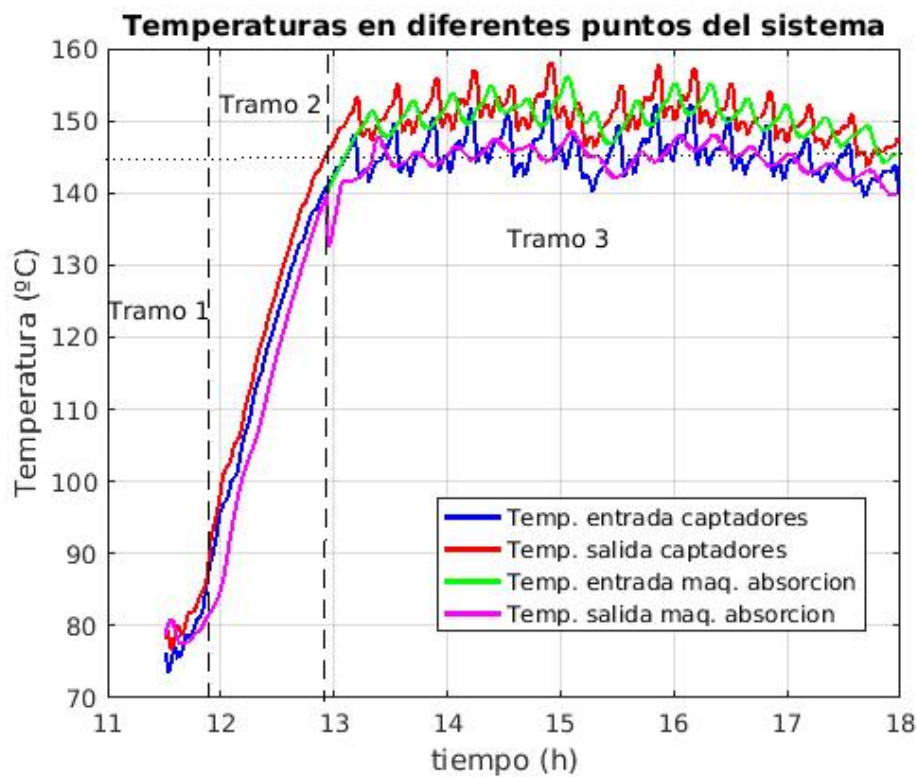


Figura 4.13 Comportamiento de la temperatura del agua en diferentes partes del sistema Captador-Máquina de Absorción en abierto.

agua y provocando variaciones de temperatura durante un reducido periodo de tiempo hasta que se estabilizan.

**Tramo 2:** El siguiente tramo corresponde al agua circulando por el sistema y siendo calentada por los paneles solares, de modo que la temperatura del agua de salida de los captadores (línea roja) es efectivamente mayor a la temperatura del agua de entrada en los captadores (línea azul) y con un cierto retraso debido al tiempo que necesita el agua para recorrer todo el campo de captadores.

Una vez fuera de los captadores, el agua recorre una larga tubería de 250 metros aproximadamente, dentro de la cual perderá energía debido a la menor temperatura de las paredes de la

misma con respecto al agua, lo que se traduce como una menor temperatura del agua (línea verde) a la salida de la tubería (entrada en la válvula) y a un retraso debido al recorrido de la tubería. Sin embargo, hasta un poco antes de las 13:00, no se hace pasar el agua por la máquina de absorción, ya que para ello es necesario que el agua alcance una temperatura de  $140^{\circ}\text{C}$ . En la figura coincide con los tramos donde la línea verde desaparece debajo de la línea morada.

**Tramo 3:** Cuando se acerca las 13:00, la temperatura del agua a su paso por la válvula comienza a superar los  $140^{\circ}\text{C}$ , lo cual hace que se accione la misma para desviar el agua hacia la máquina de absorción (las líneas verde y morada toman diferentes caminos). Dentro de la cual, se produce una absorción de energía con el objetivo de refrigerar el agua. De este modo, se tiene una temperatura del agua a la entrada de la máquina de absorción (línea verde) que es mayor que la de salida de la máquina (línea morada) y con un retraso debido a la tubería. En el punto donde la línea morada alcanza los  $140^{\circ}\text{C}$  es cuando aparece la línea verde indicándose que en este caso la temperatura que llega a la tubería 2 ha disminuido al pasar por la máquina de absorción.

En lo que sigue de día, la temperatura del agua de salida de la máquina de absorción se mueve en valores próximos a  $145^{\circ}\text{C}$  que como se dijo es la temperatura óptima de funcionamiento del generador de alta.





## 5 Planta de Refrigeración Solar

Una vez estudiado los captadores solares, el acumulador de energía y la máquina de absorción, en este capítulo, se lleva a cabo un estudio de la planta de refrigeración solar completa, mediante la unión de todos los componentes con tuberías y válvulas. Para ello, primero se indica su funcionamiento y descripción, para a continuación analizar el comportamiento independiente de los dos circuitos principales: captadores-acumulador y captadores-máquina de absorción, en bucle cerrado. Finalmente se lleva a cabo una simulación del circuito completo y se analizan los resultados obtenidos.

### 5.1 Funcionamiento y descripción

El montaje completo de la planta de refrigeración solar se puede aproximar según el esquema mostrado en la Figura 5.1. En dicho montaje se han unido en paralelo los subsistemas acumulador

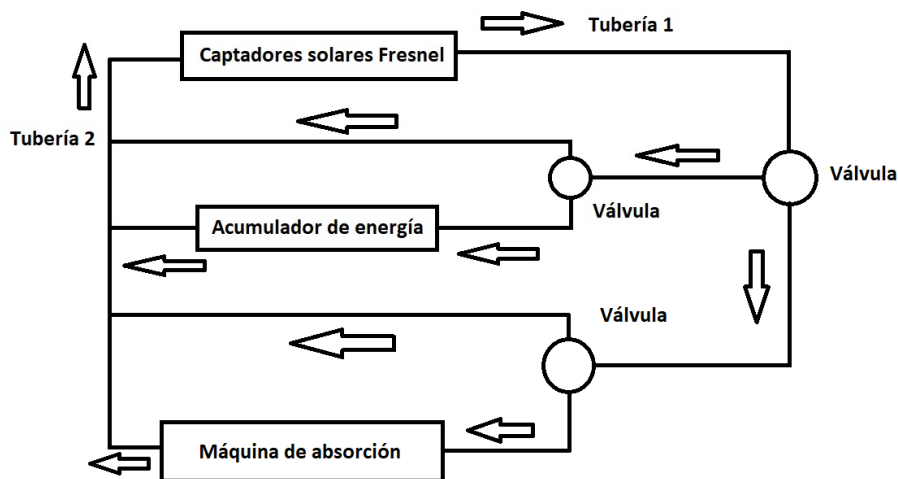


Figura 5.1 Esquema completo de la modelización.

de energía y máquina de absorción a los captadores solares. De tal modo que, el funcionamiento aproximado consistirá:

- Comenzar calentando el agua haciendo pasar ésta exclusivamente por los captadores solares.
- Una vez el agua se encuentre suficientemente caliente, activar el subsistema bucle captadores-acumulador con el objetivo de acumular energía por si fuese necesario usarla en algún momento para proporcionar energía a la máquina de absorción.

- Con el acumulador cargado de energía, activar el subsistema bucle captadores-máquina de absorción para que ésta absorba el calor del agua y pueda refrigerar las instalaciones de la ETSI.

### 5.1.1 Comportamiento de las temperaturas del montaje Captador-Acumulador en bucle

Como se mencionó anteriormente, cuando el agua esta suficientemente caliente se activa el subsistema captadores-acumulador en bucle. El diseño que se va a simular puede verse en la Figura 5.2.

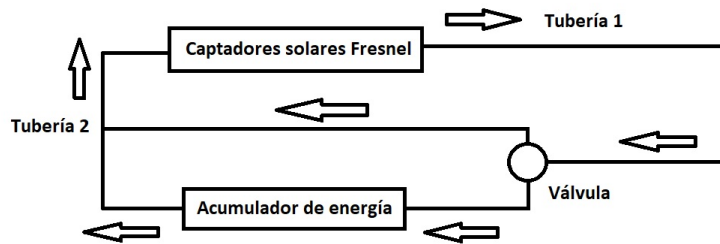


Figura 5.2 Esquema del bucle Captador-Acumulador.

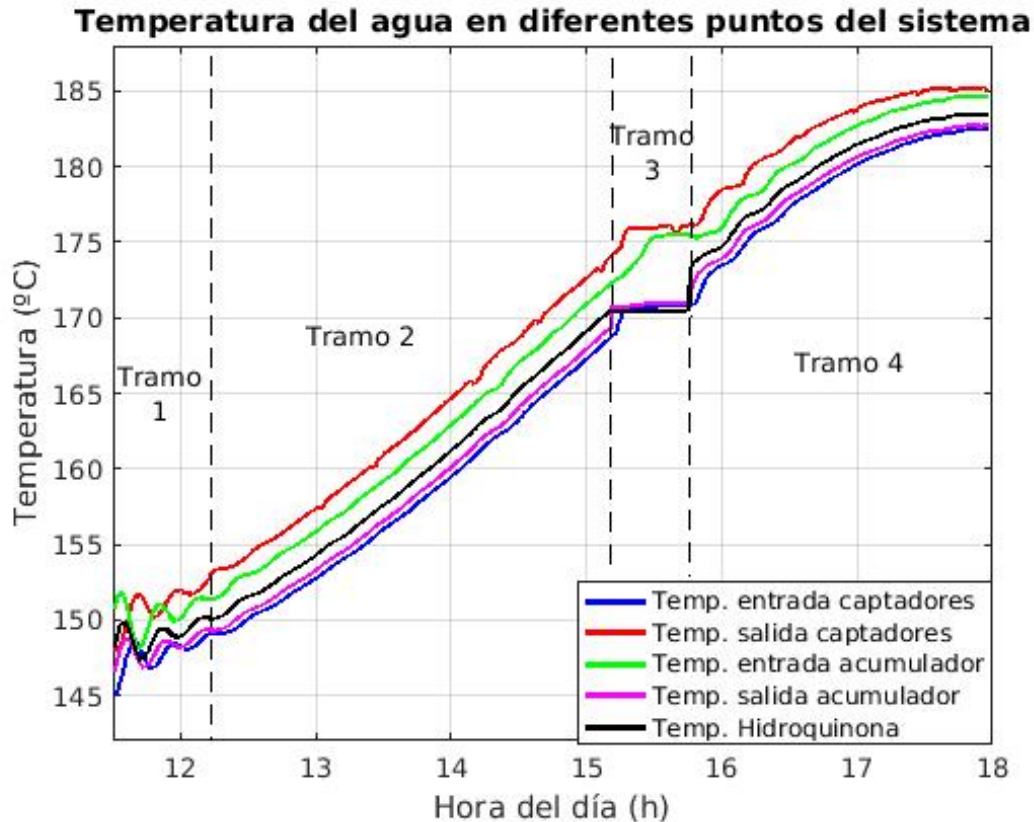
Así, se considera que las tuberías 1 y 2 tienen 250 y 100 metros de longitud, respectivamente, y en ambas el agua se encuentra a una temperatura inicial de  $155^{\circ}\text{C}$ . Dentro del acumulador, la temperatura inicial de la hidroquinona y del agua serán ambas de  $150^{\circ}\text{C}$ . Entre los captadores solares y el acumulador se incorpora una válvula de tal forma que si la temperatura del agua proveniente de la tubería 1 es inferior a  $140^{\circ}\text{C}$  no se hace pasar por el acumulador y vuelve el agua a retornar a los captadores solares. En caso de ser superior a  $140^{\circ}\text{C}$  se hace pasar el agua por el acumulador de energía.

Para la simulación se consideran los datos reales de irradiancia, temperatura ambiente, caudal, etc, que son tomados del fichero que recoge los datos del día 17 de agosto de 2009. La temperatura de entrada del agua que inicia la simulación es la primera temperatura de entrada dada ese día.

Se realiza la simulación y se obtiene la Figura 5.3 que se pasa a analizar.

- Así, se observa que la temperatura del agua a la salida de los captadores solares (línea roja) es mayor que su temperatura a la entrada (línea azul) debido a la acción de los rayos del Sol, que calientan el agua, efecto ya analizado en el Capítulo 2.
- Una vez fuera de los captadores, el agua pasa a la tubería 1 que llega a la válvula y puesto que la temperatura es superior a los  $140^{\circ}\text{C}$  se deriva al acumulador. Debido a la menor temperatura en las paredes de la tubería, se produce una transmisión de energía del agua a las paredes, lo que se traduce en una menor temperatura del agua a la entrada del acumulador (línea verde), efecto que se estudió en la Sección 2.3.
- Dentro del acumulador, el comportamiento es como se explicó en detalle en la Sección 3.4.1, es decir, el agua empieza a calentar la hidroquinona y cede calor (línea morada) por ello se encuentra por debajo de la línea verde que representa la temperatura de entrada del agua en el acumulador.
- Fuera del acumulador, la temperatura del agua vuelve a sufrir un descenso debido a su paso por la tubería 2, la cual se encuentra unida a los captadores solares (línea azul).

Dentro de esta simulación también se puede distinguir una serie de tramos donde hay algunas particularidades que se pasa a señalar.



**Figura 5.3** Temperatura del agua en diferentes puntos del sistema Captador-Acumulador junto con la temperatura de la hidroquinona dentro del acumulador de energía.

**Tramo 1:** Al comienzo de la simulación y durante algo menos de una hora se observa una inestabilidad en las diferentes temperaturas, debido a que hay algunas zonas con más temperatura que otras y viceversa. Así, cuando el agua empieza a circular por el sistema se produce una mezcla de toda el agua a diferentes temperaturas en cada parte, lo que causa que las temperaturas más altas disminuyan debido a las más bajas y viceversa.

**Tramo 2 y 4:** No presenta ninguna particularidad relevante. Entre ambos tramos hay una única diferencia ya que en el tramo 2, la hidroquinona se encuentra en estado sólido mientras que en el tramo 4 se encuentra en estado líquido.

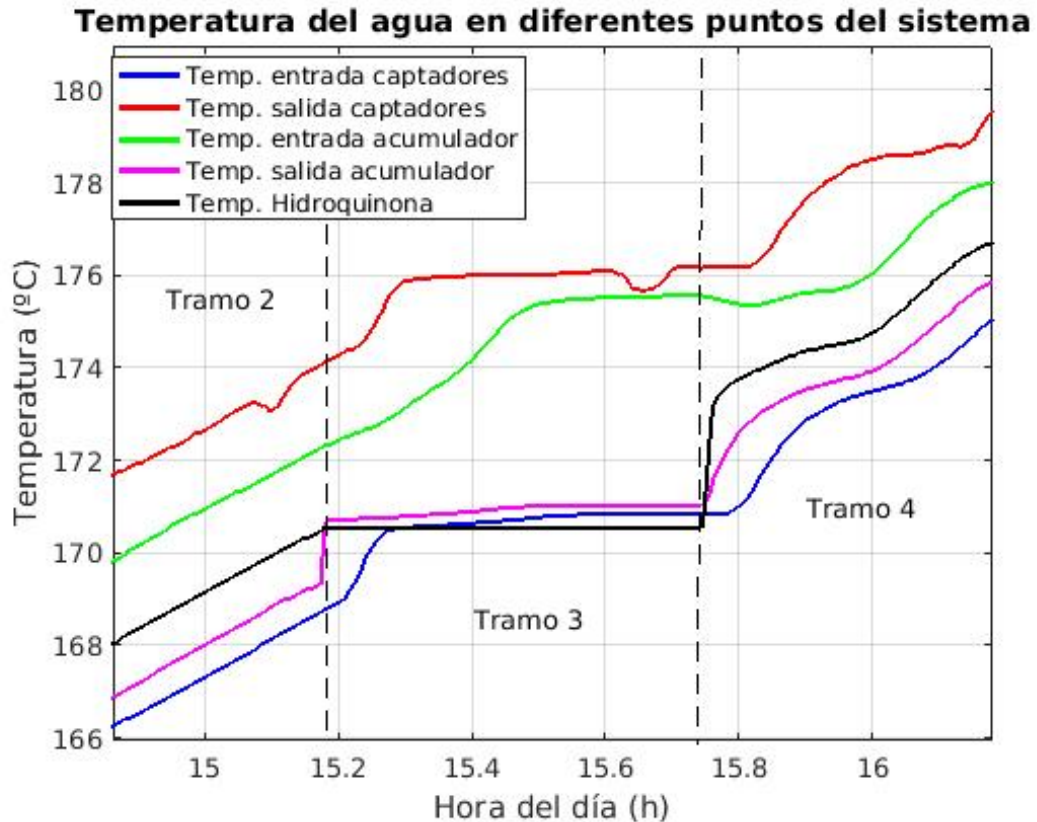
**Tramo 3:** En este tramo se llega a un punto en el cual la temperatura del agua supera a la temperatura de cambio de fase de la hidroquinona, lo que causa la fusión de la hidroquinona de sólida a líquida a temperatura constante (ver Figura 5.4).

Se debe tener en cuenta para mejor interpretar las simulaciones, los retrasos que se producen cuando el agua atraviesa cada una de los diferentes componentes: captador, tubería 1, acumulador y tubería 2.

### 5.1.2 Comportamiento de las temperaturas del montaje Captador-Máquina de Absorción en bucle

Una vez se ha cargado de energía el acumulador, es el turno de activar el subsistema bucle captador-máquina de absorción. Para ello se usan los datos del día<sup>1</sup> 29 de junio de 2009, como se hizo en el Capítulo 3 y tomando los datos proporcionados en el fichero “DATOSABSORCION.m”.

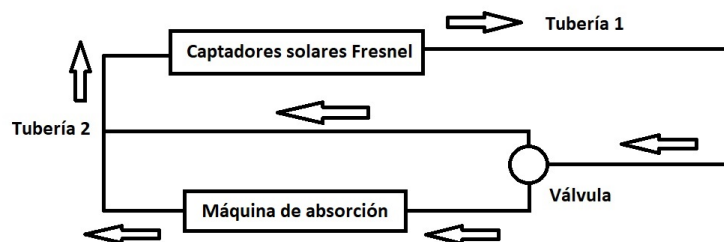
<sup>1</sup> Se elige un día distinto para tener más variedad en los datos reales.



**Figura 5.4** Zoom de la Figura 5.3 en la zona de fusión de la hidroquinona.

Para la simulación se consideran los datos reales de irradiancia, temperatura ambiente, caudal, etc, que son tomados del fichero que recoge los datos del día 29 de junio de 2009. La temperatura de entrada del agua que inicia la simulación es la primera temperatura de entrada dada ese día. Además, se considera que las tuberías 1 y 2 tienen 250 y 100 metros de longitud (aproximadamente), respectivamente, y en ambas el agua se encuentra a una temperatura inicial de  $155^{\circ}\text{C}$ , al igual que se consideró en el apartado anterior.

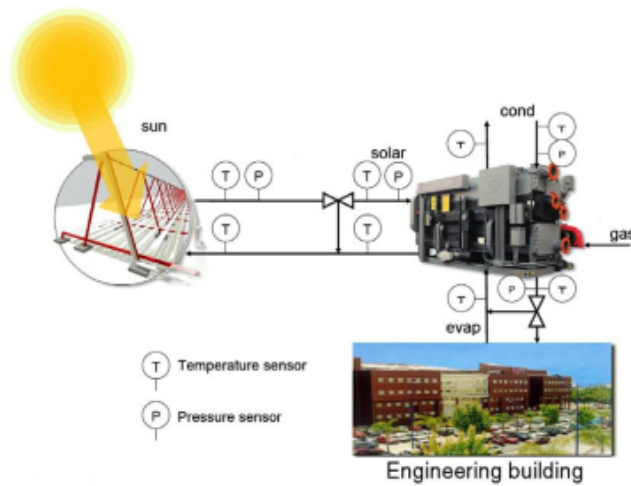
El diseño simplificado que se va a simular puede verse en la Figura 5.5 y un diseño más detallado



**Figura 5.5** Esquema del bucle Captador-Máquina de Absorción.

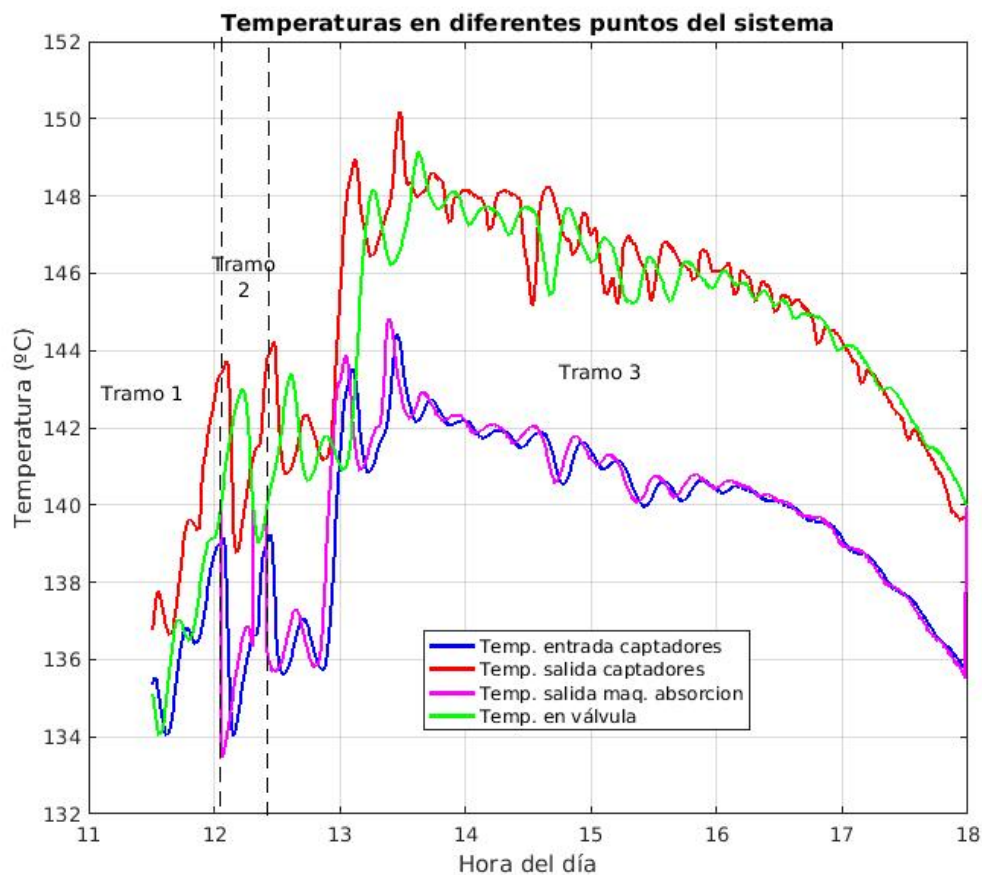
de como es la unión del captador y la máquina de absorción en la planta de la ETSI se sigue en la Figura 5.6.

Se realiza una simulación de un montaje en bucle de los captadores solares con la máquina de



**Figura 5.6** Esquema del bucle Captador-Acumulador de la ETSI.

absorción, y se tiene la Figura 5.7. De la figura se sigue, de forma similar a lo que ocurría en el bucle captador-acumulador, que:



**Figura 5.7** Comportamiento de la temperatura del agua en diferentes partes del sistema Captador-Máquina de Absorción en bucle.

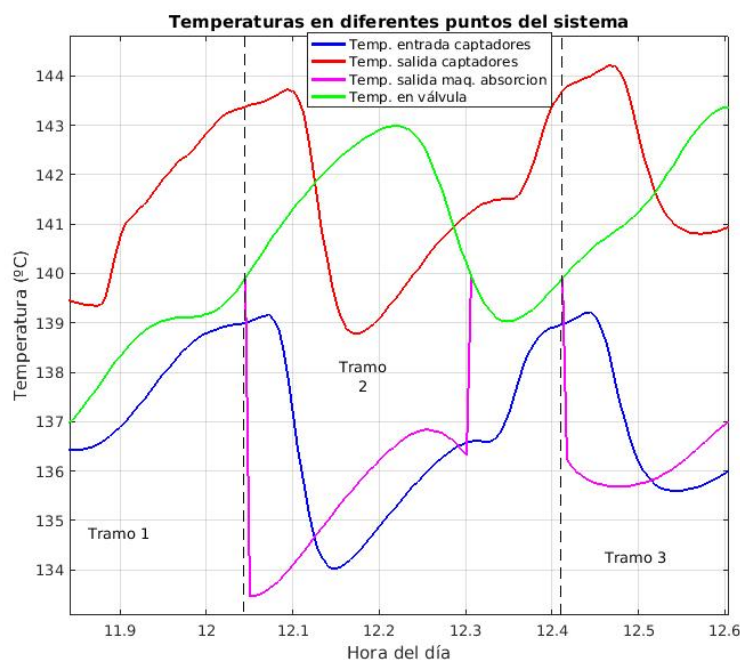
- La temperatura del agua a la salida de los captadores solares (línea roja) es mayor que su temperatura a la entrada (línea azul) debido a la acción de los rayos del sol, que calientan el agua, efecto ya analizado en el Capítulo 2.
- Una vez fuera de los captadores, el agua pasa a la tubería 1 que llega a la válvula. Así debido a la menor temperatura en las paredes de la tubería, se produce una transmisión de energía del agua a las paredes, lo que se traduce en una menor temperatura del agua a la llegada a la válvula (línea verde), efecto que se estudió en la Sección 2.3.

Lo anterior se repite a lo largo de toda la simulación. Para lo que sigue se distinguen diferentes tramos:

**Tramo 1:** En este tramo, la máquina de absorción no ha sido activada aún ya que la temperatura del agua en la válvula (línea verde) no es superior los  $140^{\circ}\text{C}$ . Por tanto, desde la válvula se envía el agua directamente a la tubería 2 y entra de nuevo en los captadores solares (línea azul).

**Tramo 2:** La máquina de absorción se activa por primera vez pasadas las 12 cuando la temperatura del agua en la válvula supera los  $140^{\circ}\text{C}$ . Al entrar el agua en la máquina de absorción se refrigera ya que se absorbe parte de su energía. De esta forma la temperatura del agua a la salida de la máquina de absorción (línea morada) será menor que a la entrada (línea verde). De aquí se redirige de nuevo a la entrada de los captadores (línea azul).

Como se puede observar en la Figura 5.8, en este tramo hay un intervalo de tiempo, [12.3, 12.4]



**Figura 5.8** Zoom de la zona más interesante del comportamiento de la temperatura del agua en diferentes partes del sistema Captador-Máquina de Absorción en bucle.

aproximadamente, donde la temperatura del agua a su llegada a la válvula es inferior a los  $140^{\circ}\text{C}$  y se desactiva la máquina de absorción, desapareciendo por tanto la línea morada, ya que el agua se envía directamente de nuevo a los captadores.

**Tramo 3:** Durante todo este tramo la máquina de absorción esta activa y como se comento en el anterior tramo, al entrar el agua en la máquina de absorción se refrigera y por ello la temperatura del agua a la salida de la máquina de absorción (línea morada) es menor que a la entrada (línea verde). De aquí se redirige de nuevo a la entrada de los captadores (línea azul).

## 5.2 Código comentado de la planta de refrigeración solar de el ETSI

La implementación completa de la planta se ha llevado a cabo elaborando el siguiente código de Matlab, el cual se muestra comentado:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Se limpia datos y figuras de la memoria y se despeja la pantalla
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;clc;close all;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Se cargan las variables del fichero de configuracion
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
configuracion;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Se definen las variables globales
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
global tint; % Tiempo de integracion
global Tambiente; % Temperatura ambiente
global tiemposimulacion; % Tiempo de la simulacion
global tacteficiencias;
global horacomienzo; % Hora de comienzo de la simulacion
global horarep;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Se introduce el fichero con datos del día considerado para el captador
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
M=load('F170809.m');% SI USAS LOS FICHEROS CON F AL PRINCIPIO DEBES CAMBIAR CONFIGURACION
% M incrementodetiempo a 60, si no dejarlo en 20
% NOMBRE DEL FICHERO VA EL DIA, CONFIGURAR ABAJO
%17 de agosto dia claro
ano=2009;
mes=08;
dia=17;
% El vector M tiene la siguiente estructura por columnas
% [hora caudal Tentrada TsalidaReal Porc_espejos Irradiancia Tambiente]
[filas columnas]=size(M); % Vector con numero de filas y columnas de M

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Hora de comienzo de toma de datos. Se toma la más cercana a las 11:00
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
hora=M(:,1);
x=find(abs(hora-horacomienzo)==min(abs(hora-horacomienzo)));
hora=hora(x); % Hora de comienzo, 11 (11:00 AM)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Interpolacion datos de los sensores
% Cada vector de datos tiene 240 muestras (1 por minuto) y queremos una
% cada 0.25s. Luego hay que interpolar 240 cada 2 datos sensores
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
numeroperiodosint=ceil(incrementodetiempo/tint); % ceil() para redondear el resultado

caudal=M(x:filas,2);

```

```

caudal=interpola(numeroperiodosint,caudal);

Tent=M(x:filas,3);
Tent=interpola(numeroperiodosint,Tent);

Tsreal=M(x:filas,4);
Tsreal=interpola(numeroperiodosint,Tsreal);

Porcentajespejos=M(x:filas,5)*0.01;
Porcentajespejos=interpola(numeroperiodosint,Porcentajespejos);

I=M(x:filas,6);
I=interpola(numeroperiodosint,I);

Tambiente=M(x:filas,7);
Tambiente=interpola(numeroperiodosint,Tambiente);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calculo del dia juliano si no se coge del fichero
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
diajuliano=Juliano(ano,mes,dia);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calculo angulo diario
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
angulodiario=angdiario(diajuliano);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Inicializacion de todas las variables: hora, eficiencias, factor de sombra
% y de las temperaturas de todos los trozos de fluido y metal.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tsal=Tsreal(1);
Ts=horasolar(hora,minuto,mes,angulodiario); % Calculo de la hora solar
Factorsombra=eficienciageoysombras(angulodiario,Ts);
% Eficiencia paneles teniendo en cuenta las sombras
Tf=ones(1,74)*Tent(1);% Perfil temperatura fluido captador, inicialmente la temp. de entrada
Tm=Tf+7; % Perfil temperatura metal captador, 7 grados más que en fluido

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Circulos necesarios para el funcionamiento del programa.
% Calculo del numero de iteraciones, correspondientes a los tiempos de
% simulacion e integracion que se han definido en el fichero de
% configuracion. Tambien se calcula el tiempo maximo de simulacion.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tiempomax=ceil(length(Tent));
Ntotal=floor(tiemposimulacion/tint);
if(Ntotal>tiempomax)
    Ntotal=tiempomax;
end

tactualizacion=ceil(tacteficiencias/tint); % Numero muestras para actualizan eficiencias
Irra=I(1);
Tamb=Tambiente(1);
Tf(1)=Tent(1);
horarep=hora;
k=1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DEFINICION VARIABLES Y TROZOS TUBERIA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tinicial=120; % Temperatura inicial
Longitud1=250; % La longitud de la tuberia 1 (Captador-Acumulador)

```



```

trozos1=25; % Numero perfil de la tuberia 1)
Tuberia1=Tinicial*ones(1,trozos1); % Perfil tuberia 1

Longitud2=100; % La longitud de la tuberia 2 (Acumulador/Máquina Absorción-Captador)
trozos2=10; % Numero perfil de la tuberia 2
Tuberia2=Tinicial*ones(1,trozos2); % Perfil tuberia 2

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DEFINICION VARIABLES ACUMULADOR
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tsalesacum=ones(2,1)*135;% Temp inicial de entrada y salida del acumulador
Volumen=3300 % Volumen Hidroquinona (L)
Masatotal=3300*1.358; % Masa total de hidroquinona (Kg) en estado sólido
% Perfil de dos tramos en el tanque de almacenamiento
Masa=[0;Masatotal]; % Masa inicial de hidroquinona [Masaliquido,Msasolido] (Kg)
Thidro=[160;160]; % Temperatura inicial de la hidroquinona solida y liquida (°C)
Taguacum=[163;163]; % Se inicializan los dos tramos para el agua (°C)
TempMaxUsarAcum=180; % Temp. maxima que debe alcanzar el agua para que se active el
% acumulador. Umbral donde se deja de almacenar energia en el
% acumulador. Esta temperatura esta por encima de la
% temperatura de fusión de la hidroquinona

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DEFINICION VARIABLES MAQUINA DE ABSORCION
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MM=load('DATOSABSORCION.m'); % Se cargan los datos del archivo DATOSABSORCION.m
% son datos de funcionamiento de la máquina de absorción
perintepabs=2; % Datos originales cada 0.5s y los queremos cada 0.25s
tiempototal=length(Tsreal); % Para que los datos reales ya interpolados tengan la
% misma dimensión que los datos que en los captadores
% Vamos a hacer que el numero de datos de la base de datos
% de los captadores sea el mismo que en la base de datos
% de la maquina de absorcion
towrefr=MM(:,1); % Temp salida agua refrigeracion
towrefr=interpola(perintepabs,towrefr); % Temp salida agua refrigeracion interpolada
towrefr=towrefr(1:tiempototal); % Temp salida agua refrigeracion,
TempMaxUsarMaqAbs=135; % Temp maxima que debe alcanzar el agua para que se active
% la maquina de absorcion

% towsc=MM(:,2); % Temp salida del agua para los captadores
% towsc=interpola(perintepabs,towsc);
%
% tiwsc=MM(:,6); % Temp entrada del agua proveniente de los captadores
% tiwsc=interpola(perintepabs,tiwsc);

towelvap=MM(:,3); % Temp salida agua evaporador
towelvap=interpola(perintepabs,towelvap);
towelvap=towelvap(1:tiempototal);

tHTG=MM(:,4); % Temp solucion (H2O-LiBr)
tHTG=interpola(perintepabs,tHTG);
tHTG=tHTG(1:tiempototal);

tiwref=MM(:,5); % Temp entrada agua refrigeracion
tiwref=interpola(perintepabs,tiwref);
tiwref=tiwref(1:tiempototal);

tiwewap=MM(:,7); % Temp entrada agua evaporador
tiwewap=interpola(perintepabs,tiwewap);
tiwewap=tiwewap(1:tiempototal);

Qcaldera=MM(:,8)*1000; % Calor quemador gas natural (generado alta temp)

```

```

Qcaldera=interpola(perintepabs,Qcaldera);
Qcaldera=Qcaldera(1:tiempototal);

qwater=caudal; % Caudal captador del dia considerado
%qwater=MM(:,9); % caudal de agua que entra en el generador de alta
%qwater=interpola(perintepabs,qwater);

qrefrig=MM(:,10); % Caudal refrigerante
qrefrig=interpola(perintepabs,qrefrig);
qrefrig=qrefrig(1:tiempototal);

qevap=MM(:,11); % Caudal agua climatizacion (evaporador)
qevap=interpola(perintepabs,qevap);
qevap=qevap(1:tiempototal);

tambi=Tambiente; % Temp ambiente del dia considerado
%tambi=MM(:,12); % Temp ambiente
%tambi=interpola(perintepabs,tambi);

Tgenalta=MM(:,13); % Temp generado alta temp
Tgenalta=interpola(perintepabs,Tgenalta);
Tgenalta=Tgenalta(1:tiempototal);

qcapt=caudal; % Caudal captador del dia considerado
%qcapt=MM(:,14); % caudal agua captadores
%qcapt=interpola(perintepabs,qcapt);

ts=0.25; % Intervalo de tiempo (0.25s)
kstop=size(caudal,1); % Tiempo maximo de ejecucion=numero de filas de
% los datos experimentales

ent=[Qcaldera*0 tambi qwater qrefrig qevap];
towsc(1)=Tuberia2(1); % Temp salida maquina= Temp entrada tuberia 2
y(1,:)=[towsc(1) towrefr(1) towevap(1) tHTG(1)];
% Vector para guardar las variable de salida del sistema

tiwsc(1)=Tuberia1(end); % Temp entrada maquina = Temp salida tuberia 1
u=[tiwsc(1) tiwref(1) tiwevap(1)];
% Vector para guardar las variable de entrada del sistema

y_out=y'; % Trasponer vector para dimensionar adecuadamente

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%VARIABLES BINARIAS
% para modelar la activacion (1) o desactivacion (0)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
usaacumulador=0; % Acumulador desactivado inicialmente
usamaquinaabsorcion=0; % Maquina de absorcion desactivada inicialmente

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for j=2:Ntotal-1

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Circulo de la evolucion de la hora y actualizacion de variables necesarias
% para la computacion del modelo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

horarep=horarep+tint/3600;
% Si se quiere simular en serie, el agua sale despues de pasar por
% Acumulado/Máquina
%Tf(1)=Tent(j);
% Si se quiere simular en bucle (ciclo), el agua del acumulador/maquina
% vuelve a la entrada del captador
Tf(1)=Tuberia2(end); % Final tuberia2 conectada al principio de los captadores (BUCLE)

```

```

Irra=I(j)+2*randn(1,1);% Irradiacion con una aleatoriedad
Tamb=Tambiente(j); % Temperatura ambiente
Porcentajetubo=1; % Modula la eficiencia del captador
q=caudal(j); % OJO viene en m3/segundo hay que dividir por 3600

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Actualizacion de eficiencias, hora solar y factor de sombra
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if(rem(j,tactualizacion)==0)%cada 15 minutos
    minuto=minuto+10/60;
    if(minuto>=60)
        hora=hora+1;
        if(hora==24)
            hora=0;
        end
        minuto=minuto-60;
    end
    Ts=horasolar(hora,minuto,mes,angulodiario);
    Factorsombra=eficienciageoysombras(angulodiario,Ts);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELO CAPTADOR
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[Tm,Tf]=calcTemp(Tm,Tf,Tamb,Irra,Factorsombra,q,Eficienciaimedia,Porcentajetubo);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELO TUBERIA 1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tuberia1(1)=Tf(end); % Temp entrada tuberia 1= temp salida captador
Tuberia1=calctubacum(Tuberia1,q,Tamb,Longitud1,trozos1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELO ACUMULADOR
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Al inicio se obliga a que se active primero el acumulador, con el
% objetivo de que sea cargado de energia
if(Tuberia1(end)>mean(Taguacum)-10)
    usaacumulador=1;
end

% Si el acumulador esta cargado, se apaga y se enciende la máquina
if(Taguacum(end)>TempMaxUsarAcum && usaacumulador==1)
    usaacumulador=0;
    usamaquinaabsorcion=1;
end

if(usaacumulador==1) % si el acumulador esta activado
    Taguacum(1)=Tuberia1(end); % Temp entrada acumulador =Temp salida Tuberia 1
    % se llama ACUMULADOR.m para calcular Temp salida acumulador
    [Taguacum,Masa,Thidro]=ACUMULADOR(Tamb,q,Taguacum,Masa,Thidro);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELO MAQUINA DE ABSORCION
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Mientras Temp salida tuberia 1 < 135 NO se activa maquina de absorcion
if(usamaquinaabsorcion==1) % si la maquina de absorcion esta activada
    tiwsc(j)=Tuberia1(end); % la entrada de la maquina es la salida de tuberia 1
    if(Tuberia1(end)>TempMaxUsarMaqAbs) % se habilita la maquina de absorcion
        [dT0]=maq_absorcion(ts,y_out,u(1,:),ent(j-1,:)); % Se llama a maq_absorcion
        y_out=y_out+dT0*ts; % Se integral las variables con un tintegracion de 0.25s
    end
end

```

```

    end
    u(1,:)=[tiwsc(j) tiwref(j) tiwevap(j)]; % Se actualiza el vector u
    y(j,:)=y_out; % Se actualiza el vector y
    towsc(j)=y_out(1)';
end

% Si no esta activado ni el acumulador ni la maquina de absorcion
% los captadores se realimentan a ellos mismos
if(usamaquinaabsorcion==0 && usaacumulador==0)
Tuberia2(1)=Tuberia1(end); % El agua pasa de la tuberia 1 a las dos directamente
end

% Si el acumulador esta activado, se tiene bucle captadores-acumulador
if(usaacumulador==1 && usamaquinaabsorcion==0)
    % Captador unido a acumulador, pero no a maquina de absorcion
    Tuberia2(1)=Taguacum(2); %Temp. salida acumulador = Temp. entrada Tuberia2
end

% Si la maquina de absorcion esta activada, se tiene bucle captadores-maquina de absorcion
if(usamaquinaabsorcion==1)
    if(Tuberia1(end)>TempMaxUsarMaqAbs)
        Tuberia2(1)=towsc(j); % Temp entrada tuberia 2 = Temp salida maquina
    else
        Tuberia2(1)=Tuberia1(end);
    end
end

%
%%
% Tuberia retorno acumulador
%
%%
Tuberia2=calctubacum(Tuberia2,q,Tamb,Longitud2,trozos2);
    % La temp. de la Tuberia2 se calcula en el archivo calctubacum.m

%%
% Tuberia retorno maquina absorcion
%%
Tuberia2=calctubacum(Tuberia2,q,Tamb,Longitud2,trozos2); % Temp salida Tuberia2

if( horarep>11.5 && rem(j,20/tint)==0)
    % Se toma para representar las 11:30, hora de comienzo de la
    % operatividad de la maquina absorcion
    tiempo(k)=horarep;
    Tsalida(k)=Tf(end);
    Tentrada(k)=Tf(1);
    Irradiancia(k)=Irra;
    cau(k)=q;
    Tsalidamaq(k)=y_out(1);
    Tempcaldera(k)=y_out(4);
    Tsaltub1(k)=Tuberia1(end);
    Tsalabs(k)=Tuberia2(1);
    Tsalacum(k)=Taguacum(end);
    k=k+1;
end
end

%%
% Representacion de la Irradiancia
%%
figure
plot(tiempo,Irradiancia,'b-','LineWidth',1.5);
ylabel('Irradiancia (W/m^2)');xlabel('tiempo (horas)');grid;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Representacion de las temperaturas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure
title('Temperaturas en diferentes puntos del sistema');
aaa=153*ones(1,length(tiempo));
bbb=180*ones(1,length(tiempo));
ccc=135*ones(1,length(tiempo));
plot(tiempo,Tentrada,'b-','LineWidth',2),hold,plot(tiempo,Tsalida,'r-','LineWidth',2),
plot(tiempo,Tsaltub1,'g-','LineWidth',2),plot(tiempo,Tsalabs,'m-','LineWidth',2);
plot(tiempo,aaa,'--');plot(tiempo,bbb,'--');plot(tiempo,ccc,'--');
legend('Entrada captadores','Salida captadores','Entrada acumulador/maq. absorcion',...
'Salida acumulador/maq. absorcion');grid;
xlabel('Hora del día');ylabel('Temperatura (°C)');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Fin del programa
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

### 5.3 Simulación de la PRS de la ETSI: Captador Solar de Fresnel, Acumulador de Energía y Máquina de Absorción

Previamente a la ejecución del programa anterior, se presenta la Tabla 5.1 con los datos de referencia más significativos del mismo, con objeto de comprender mejor la salida que nos va a proporcionar.

**Tabla 5.1** Valores de inicio y de funcionamiento del programa de ejecución de la planta completa.

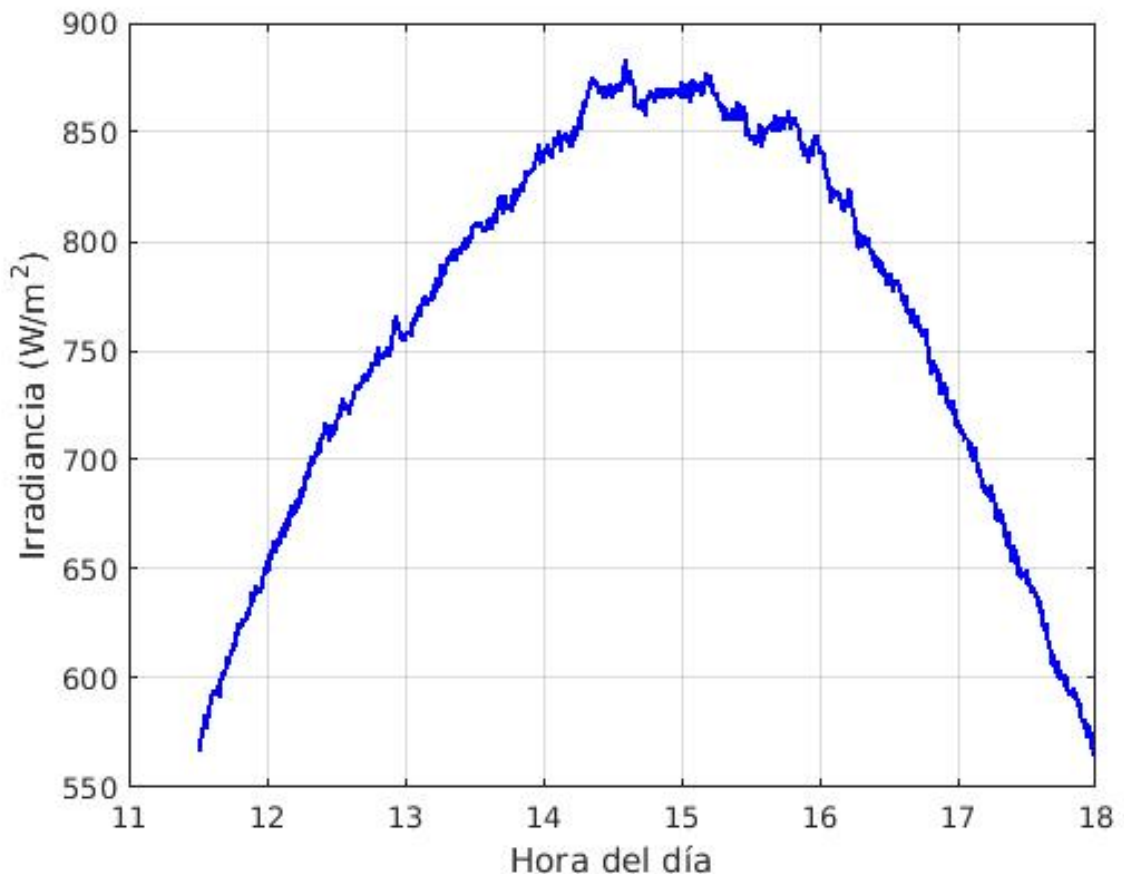
Componente	Temperatura inicial (°C)	Nº Trozos Perfil	Longitud (m)
<b>Tuberías</b>			
Tubería 1	120	25	250
Tubería 2	120	10	100
<b>Acumulador</b>			
Agua	163	2	
Hidroquinona	160	2	
Temperatura mínima del agua para que se active = 153°C			
Temperatura máxima del agua para que se desactive = 180°C			
<b>Máquina Absorción</b>			
Temperatura mínima del agua para que se active = 135°C			

La ejecución del programa nos proporciona las Figuras 5.9 y 5.10, la cual pasamos a comentar por tramos.

**Tramo 1:** (Circuito Colector-Collector) La planta de refrigeración solar se pone en funcionamiento en torno a las 11:30 de la mañana y este tramo termina aproximadamente sobre las 13:00.

Inicialmente, tanto el acumulador de energía como la máquina de absorción están desactivadas. De modo que los rayos solares calientan el agua circulante y es realimentada de nuevo a los captadores (Línea roja de salida y línea verde de entrada del agua de/en los captadores solares) (Capítulo 2). Hay tres maneras de salir de este circuito:

- Si la temperatura de entrada del agua en los colectores solares supera los 190 °C, el sistema de control pondría los espejos de los captadores solares en modo de seguridad (ver Figura 2.8).



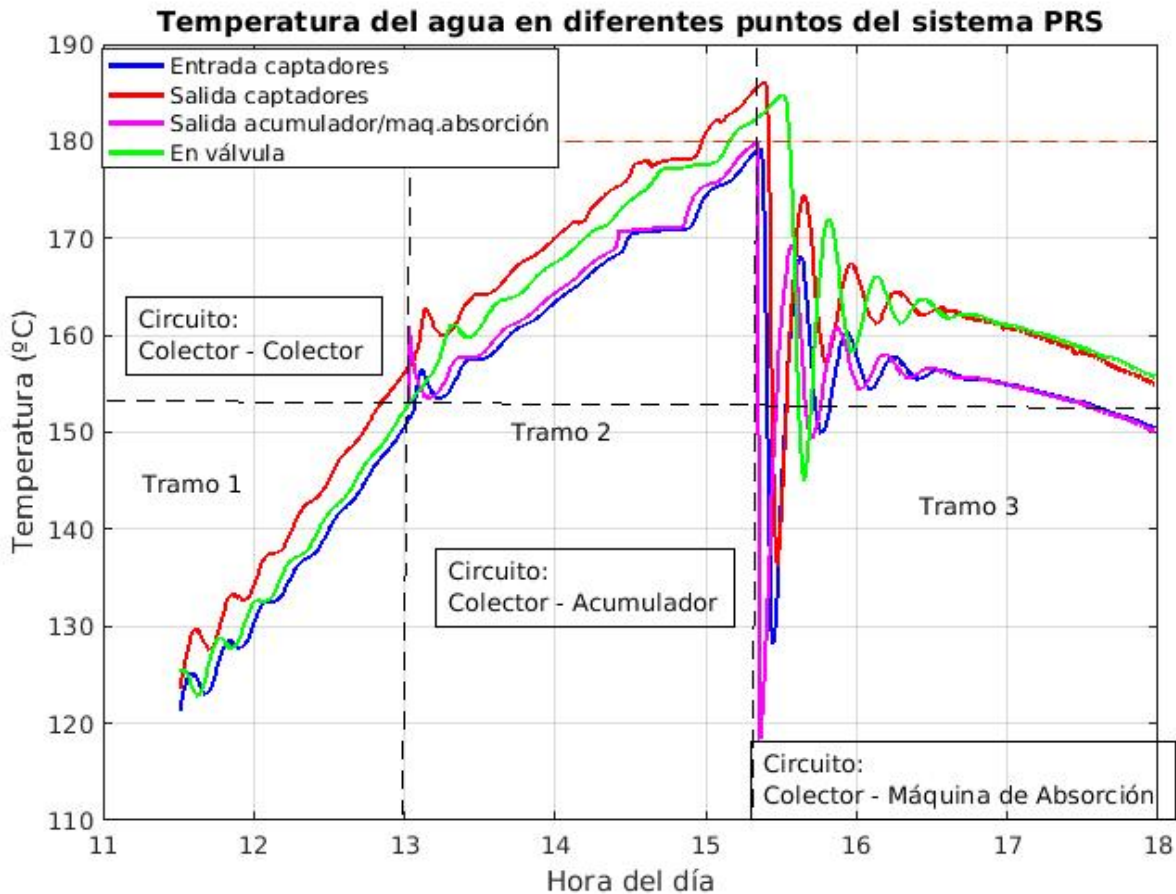
**Figura 5.9** Irradiancia del día 17 de agosto de 2009.

- Estando el acumulador cargado de energía y la máquina de absorción desactivada, cuando la temperatura del agua en la válvula supera los  $135^{\circ}\text{C}$ , se activa la máquina de absorción y se hace pasar el agua a través de ella.
- Estando el acumulador y la máquina de absorción desactivada, cuando la temperatura del agua en la válvula supera los  $153^{\circ}\text{C}$ , se activa el acumulador y se hace pasar el agua a través de él.

**Tramo 2:** (Circuito Colector-Acumulador) Cuando la temperatura del agua en la válvula (línea verde) supera los  $153^{\circ}\text{C}$ , se produce la activación del acumulador y se entra en este segundo tramo. Esto es así ya que se ha impuesto que primero se active el acumulador para cargarlo de energía.

Por tanto, una vez alcanzada dicha temperatura, en torno a las 13:00, se hace circular el agua por el acumulador y se realimenta a los captadores (línea morada). Esto comienza con un brusco incremento en la temperatura de salida del acumulador hasta los  $163^{\circ}\text{C}$ , ya que esa es la temperatura inicial de los tramos para el agua dentro del acumulador (ver Tabla 5.1). A continuación, el agua continúa aumentando de temperatura y a su vez calienta la hidroquinona del interior del acumulador hasta que, aproximadamente sobre las 14:15, alcanza su temperatura de fusión y la hidroquinona pasa a estado líquido a temperatura constante.

Una vez que toda la hidroquinona ha sido fundida, sobre las 14:50, se continúa aumentando la temperatura hasta alcanzar los  $180^{\circ}\text{C}$ , la cual es la temperatura máxima de uso del acumulador especificada (ver Tabla 5.1), y por tanto el acumulador alcanza su capacidad máxima de



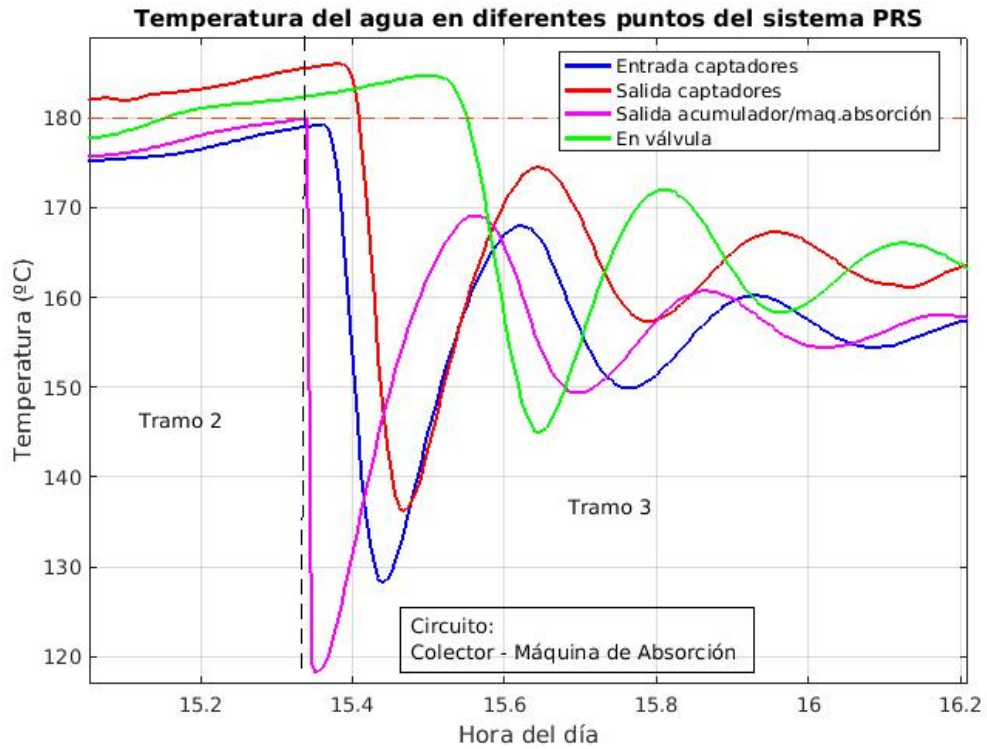
**Figura 5.10** Simulación de la planta completa con datos de la máquina de absorción del 17 de agosto de 2009.

acumulación de energía. En este punto, se desactiva el bucle captadores-acumulador y se activa el bucle captadores-máquina de absorción en torno a las 15:35.

**Tramo 3:** (Circuito Colector-Máquina de Absorción) Sobre las 15:35 comienza este tramo e inmediatamente se produce un brusco descenso de la temperatura del agua, lo cual es totalmente lógico, ya que durante el tiempo que el circuito colector-acumulador estuvo activo, dichas componentes y sus tuberías de unión han estado siendo calentadas durante muchas horas y a temperaturas muy altas, mientras que, tanto la máquina de absorción como sus tuberías han estado a temperaturas menores.

Después del brusco descenso, las temperaturas intentan volver a subir debido a la transmisión de calor del agua proveniente de los captadores con las temperaturas de las tuberías de la máquina de absorción (ver Figura 5.11). Pero, conforme avanzan las horas de la tarde, se producen unas variaciones de temperatura hasta que se empiezan a descender de forma más estable, todo esto debido a la acción de refrigeración de la máquina de absorción y de la cada vez menos intensidad de los rayos del sol.

Durante todo el tramo 3, la temperatura del agua a su paso por la válvula nunca ha sido inferior a 135°C, que es la temperatura mínima para que la máquina de absorción se encuentre activa (ver Tabla 5.1). Por ello, durante este tramo nunca ha sido desactivada la máquina, sin embargo, es fácil seguir que a las horas finales del día, si la temperatura del agua a su paso por la válvula sigue la evolución que se observa en la Figura 5.10, la temperatura bajará de



**Figura 5.11** Ampliación de la simulación de la planta completa con datos de la máquina de absorción del 17 de agosto de 2009 en el tramo 3.

los  $135^{\circ}\text{C}$  y el agua dejará de pasar por la máquina de absorción. Ello se sigue de forma clara, si se observa el comportamiento de la irradiancia solar, el cual empieza a caer drásticamente al final de la tarde y por tanto, el agua no será calentada dentro de los colectores solares. Llegado este punto, habría que apagar la bomba que pone en funcionamiento los colectores solares hasta el día siguiente.



# Conclusiones

---

En la modelización de tres de las principales componentes de la Planta de Refrigeración Solar de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla: Captador Solar de Fresnel, Acumulador de Energía y Máquina de Absorción, realizada en este trabajo de finalización del grado en Electrónica, Robótica y Mecatrónica, se puede concluir que:

- La modelización de la temperatura de salida del agua de los captadores solares de Fresnel, réplica bien la dinámica de la misma pero tiende a proporcionar un valor menor al obtenido por los sensores de temperatura instalados en la planta. Probablemente se deba a que en la formulación se ha dado un mayor peso a las pérdidas que se producen dentro del colector. Por otro lado, no sería lógico, pero se debe analizar si la medida que proporciona el sensor se aproxima a la real.
- El modelo que describe la temperatura del agua dentro de la tubería pone de manifiesto la gran cantidad de energía calorífica que se pierde por estos conductos, lo que trae como consecuencia una disminución bastante grande del rendimiento de los captadores solares. Así se ha modelado en una tubería de 250 metros que se pierde aproximadamente un 50 % de la temperatura ganada con el colector.
- La modelización llevada a cabo con el acumulador de energía a pesar de las simplificaciones llevadas en el mismo (un único tubo, perfil de dos tramos, etc.) refleja muy bien la dinámica de funcionamiento del mismo.
- Respecto a los modelos desarrollados en la máquina de absorción, se observa que a diferencia del modelo del captador solar, no existe un error sistemático. La modelización de la temperatura del agua, si sigue la dinámica real dentro de la máquina y los indicadores de calidad no se alejan más allá de un 4 %. La modelización de la temperatura del agua en el generador de alta es la que tiene un mejor error absoluto porcentual medio (1.79 %) y el peor se presenta en el evaporador con un 3.85 %.

Respecto a posibles trabajos futuros, se podría considerar:

- Respecto a la modelización en los captadores solares, modificar la misma en la dirección de evitar el error sistemático que parece proporciona el modelo desarrollado en este trabajo.
- Al igual que se ha analizado la temperatura del agua a la salida de los captadores proporcionada por el modelo así como con la obtenida por los sensores de temperatura, sería conveniente llevar a cabo un estudio similar con los datos proporcionado por el modelo del acumulador de energía y de la máquina de absorción.
- Teniendo como guía lo presentado en este trabajo, seguir en la misma línea mejorando todo y cada uno de los diferentes aspectos analizados en el mismo.



# Índice de Figuras

---

1.1	Fachada del edificio principal de la ETSI de Sevilla (izquierda). Situación de los colectores solares en la azotea de uno de los edificios de la ETSI (derecha)	1
1.2	Esquema general inicial de la PRS de la ETSI de Sevilla (año 2009)	2
1.3	Esquema general actual de la PRS de la ETSI de Sevilla	3
1.4	Esquema general comentado de la PRS de la ETSI (Sevilla) [?]	5
2.1	Geometría de los captadores solares parabólicos. El punto rojo representa el foco de la parábola	7
2.2	Incidencia de los rayos solares en un captador solar parabólico real	8
2.3	Geometría lineal de los captadores solares de Fresnel. El punto rojo representa el foco donde inciden los rayos solares	8
2.4	Incidencia de los rayos solares en un captador solar lineal de Fresnel real	8
2.5	Esquema de la incidencia de los rayos solares en un captador lineal de Fresnel	10
2.6	Estructura y captadores solares de Fresnel de ETSI. Nótese que no hay ninguna estructura más alta que pueda dar sombra a los espejos	12
2.7	Tubo receptor/absorbedor y espejos secundarios	12
2.8	Mecanismos de arrastre y control para el seguimiento solar de los concentradores. En este caso, se encuentra en vertical y no proyecta la luz solar al tubo absorbedor, es decir, esta en modo de seguridad	13
2.9	Sensor de luz (izquierda) y sensor de temperatura (derecha)	13
2.10	Interpretación gráfica de las ecuaciones (2.1)-(2.3). En rojo y azul se muestra el desplazamiento del fluido dentro del tubo receptor	14
2.11	Imagen de distintas tuberías	16
2.12	Representación gráfica lineal del comportamiento de la temperatura de salida del agua de una tubería en función de la longitud de la misma	17
2.13	Montaje inicial: Captadores solares de Fresnel-Tubería	17
2.14	Interpolación lineal. Los puntos originales se muestran en rojo y los puntos obtenidos por interpolación en azul	18
2.15	Irradiación solar correspondiente al 29 de junio de 2009 en el techo de ETSI (Sevilla)	18
2.16	Temperatura del agua en diferentes puntos del sistema captador + tubería obtenidas en la simulación	19
2.17	Visualización de la ganancia de temperatura del agua en los captadores y la pérdida de la misma a su paso por la tubería	20
2.18	Comparativa gráfica entre la temperatura real y la temperatura modelada del agua en la salida de los captadores solares del día 29 de junio de 2009	21

3.1	Acumulador de Energía de la ETSI de la Universidad de Sevilla	23
3.2	Modelo simplificado de un tanque de tubos de un acumulador de energía	24
3.3	Secciones transversales de un sistema PCM en diferentes momentos del cambio de fase para diferentes puntos del almacenador. Rojo indica líquido y azul indica sólido	25
3.4	Esquema del acumulador de la ETSI de Sevilla	25
3.5	Composición química de la Hidroquinona: $C_6H_6O_2$ / $C_6H_4(OH)_2$ . Dihidroxibenceno. Masa molecular: 110.1	26
3.6	Comportamiento de la temperatura de la hidroquinona y la temperatura de entrada del agua en el acumulador de energía	30
3.7	Comportamiento de las masas de la hidroquinona en sus diferentes estados dentro del acumulador de energía	30
3.8	Esquema del bucle Captador-Acumulador en abierto.	31
3.9	Temperaturas obtenidas con la simulación del bloque captador + acumulador con datos del día 17 de agosto de 2009	32
3.10	Comparativa gráfica entre la temperatura real y la temperatura modelada del agua en la salida de los captadores solares del día 17 de agosto de 2009	33
4.1	Esquema visual de los componentes de una máquina de absorción ideal	36
4.2	Esquema de funcionamiento de una máquina de absorción "ideal"	37
4.3	Máquina de Absorción de la ETSI de la Universidad de Sevilla. Máquina de doble efecto con ciclo LiBr/agua, modelo BROAD-BZH15 fabricado en China	37
4.4	Esquema de los componentes de una máquina de absorción de doble efecto	38
4.5	Esquema del diseño de implementación de la máquina de absorción	40
4.6	Inyección de agua con diferentes caudales en el Generador de Alta	44
4.7	Temperaturas dentro del Generador de Alta obtenida de una simulación	44
4.8	Temperaturas real y modelada del HTG dentro del Generador de Alta. Gráfica de los errores	45
4.9	Temperaturas real y modelada del agua en la salida del Generador de Alta. Gráfica de los errores	46
4.10	Temperaturas real y modelada del agua en el Evaporador. Gráfica de los errores	46
4.11	Temperaturas real y modelada del agua en el Refrigerador. Gráfica de los errores	47
4.12	Esquema del Captador-Máquina de Absorción en abierto	48
4.13	Comportamiento de la temperatura del agua en diferentes partes del sistema Captador-Máquina de Absorción en abierto	48
5.1	Esquema completo de la modelización	51
5.2	Esquema del bucle Captador-Acumulador	52
5.3	Temperatura del agua en diferentes puntos del sistema Captador-Acumulador junto con la temperatura de la hidroquinona dentro del acumulador de energía	53
5.4	Zoom de la Figura 5.3 en la zona de fusión de la hidroquinona	54
5.5	Esquema del bucle Captador-Máquina de Absorción	54
5.6	Esquema del bucle Captador-Acumulador de la ETSI	55
5.7	Comportamiento de la temperatura del agua en diferentes partes del sistema Captador-Máquina de Absorción en bucle	55
5.8	Zoom de la zona más interesante del comportamiento de la temperatura del agua en diferentes partes del sistema Captador-Máquina de Absorción en bucle	56
5.9	Irradiancia del día 17 de agosto de 2009	64
5.10	Simulación de la planta completa con datos de la máquina de absorción del 17 de agosto de 2009	65
5.11	Ampliación de la simulación de la planta completa con datos de la máquina de absorción del 17 de agosto de 2009 en el tramo 3	66

# Índice de Tablas

---

2.1	Diferencia entre la tecnología de los captadores parabólicos y los captadores lineales de Fresnel [?, ?]	10
2.2	Características del sistema de captación solar de Fresnel de la ETSI de Sevilla	11
2.3	Dimensiones y propiedades del tubo receptor	11
2.4	Dimensiones y propiedades del reflector secundario	11
2.5	Variables de la modelización del colector solar. El asterisco significa que estos valores se siguen de un conjunto de funciones implementadas en Matlab	14
2.6	Parámetros de la modelización del colector solar. El asterisco significa que estos valores se siguen de un conjunto de funciones implementadas en Matlab	15
2.7	Indicadores de calidad del error. Errores en la modelización del captador solar del día 29/06/2009	21
3.1	Características del acumulador de la ETSI	26
3.2	Características básicas de la Hidroquinona	26
3.3	Variables de entrada y salida en el acumulador de energía	28
3.4	Parámetros en el acumulador de energía	29
3.5	Indicadores de calidad del error en dos días diferentes	33
4.1	Parámetros nominales de la máquina de absorción BROAD-BZH 15	38
4.2	Variables del generador de alta en la máquina de absorción	42
4.3	Parámetros del generador de alta en la máquina de absorción	42
4.4	Variables y parámetros del evaporador en la máquina de absorción	42
4.5	Variables del refrigerador en la máquina de absorción	43
4.6	Errores en la modelización de los componentes de la máquina de absorción	47
5.1	Valores de inicio y de funcionamiento del programa de ejecución de la planta completa	63

