

Capítulo 3

Descripción de la planta.

En este capítulo se realizará una descripción detallada de la planta de refrigeración solar por absorción situada en el edificio principal de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Sevilla (ESI). Se describirán el funcionamiento, los equipos que la componen y la interconexión entre ellos.

Dicha planta puede tener dos modos de funcionamiento (ver figura 3.1), un modo de calefacción, que aprovecha la energía solar para aportar energía al sistema de calefacción de la ESI y un modo de refrigeración, que aprovecha dicha energía para enfriar el circuito de refrigeración. Este proyecto se centrará en el modo de refrigeración.

El fin último de dicha planta es enfriar un flujo de impulsión procedente del sistema de refrigeración de la ESI. La temperatura de entrada a la máquina es de 12°C , pudiéndose enfriar hasta 7°C cuando la máquina funciona a su máxima potencia frigorífica. La radiación del sol se recoge en forma de calor en un captador solar de concentración de tipo Fresnel, utilizando como fluido caloportador agua

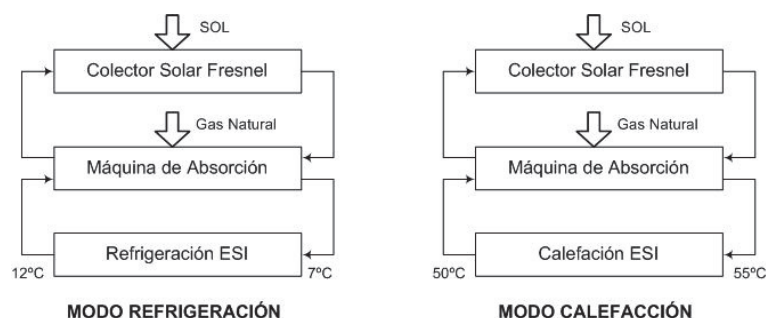


Figura 3.1: Modos de funcionamiento.

a 180°C y 1.3 MPa. El agua sobrecalentada se utiliza para accionar una máquina climatizadora de absorción de doble efecto de 174 kW, que transforma la energía térmica en frío apto para la climatización de varias dependencias de la ESI. Cuando la irradiación es insuficiente para accionar la máquina de absorción, la energía proporcionada por la combustión de gas natural sirve de apoyo para mantener el proceso en funcionamiento. Si, en cambio, hay exceso de energía ésta se almacenará en un sistema de acumulación de materiales de cambio de fase (PCM) para aprovechar los momentos de baja radiación (Ampliación realizada en la Fase II del proyecto).

Esta planta se puso en funcionamiento en 2008. Tras dos años de funcionamiento se realizó una ampliación para mejorarla, se incluyó un sistema de acumulación para almacenar la energía sobrante en los momentos de mayor radiación solar y aprovecharla cuando no haya suficiente energía. Debido a esto se pueden diferenciar dos fases en la vida de dicha instalación.

Para una mejor comprensión del trabajo realizado en este proyecto se describirán las distintas fases que ha sufrido la planta por separado, puesto que el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática ha participado activamente en la realización de la Fase II. Sin una vista clara del punto de partida no se puede apreciar el trabajo que se ha realizado en este proyecto.

3.1. Primera fase

En la figura 3.2 se puede observar el esquema de la Fase I. Este es el punto de partida de este proyecto. En él se puede observar los principales componentes de la planta: el sistema solar, la máquina de absorción y el sistema de refrigeración de la misma, que serán descritos a continuación.

Sistema solar.

El sistema solar está compuesto por un conjunto de captadores solares tipo Fresnel [3]. Son sistemas de foco lineal, es decir, concentran la radiación solar a lo largo de una línea, que corresponde a un tubo de absorción por el que circula un fluido térmico (en nuestro caso agua). El sistema concentrador está constituido por superficies reflectoras con un elevado radio de curvatura que interceptan y reflejan la radiación solar dirigiéndola hacia el tubo receptor, situado en un plano diferente al de reflexión. Una vez que la radiación llega al receptor, éste la convierte en energía térmica. Los elementos que constituyen este captador son los siguientes:

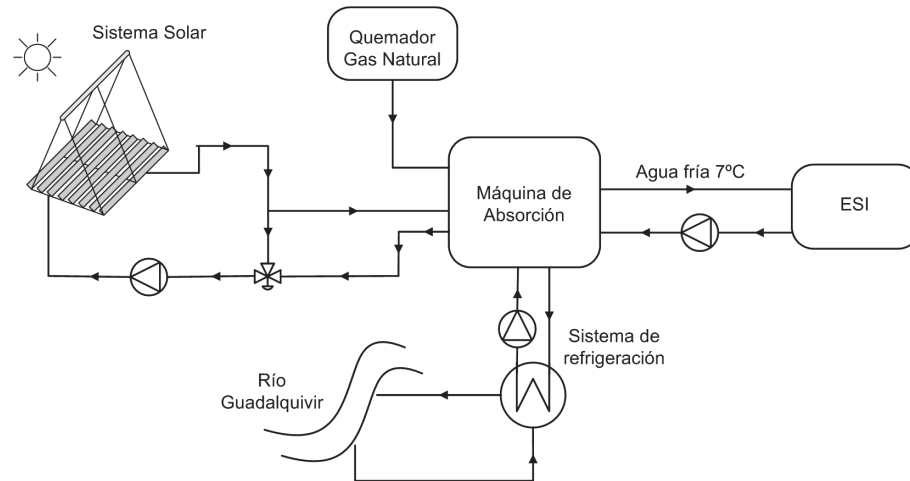


Figura 3.2: Esquema general de la planta de la Fase I.

- Espejos primarios (concentradores reflectores de la radiación solar planos), hechos de vidrios de seguridad ligeramente curvados elásticamente (con un radio de curvatura entre 8.6 - 10.6 m) y pegados a la estructura soporte (ver figura 3.3(a)), que es movida por un mecanismo de arrastre (ver figura 3.3(b)). Dicho mecanismo sirve para seguir la trayectoria del sol de modo que los espejos siempre estén enfocados hacia el colector y funciona de modo autónomo. Cada mecanismo de arrastre mueve ocho espejos de una fila, cuatro en cada lado. En total se tiene 11 filas obteniendo 352 m^2 de superficie reflectora.



(a) Reflectores primarios.



(b) Mecanismo de arrastre.

Figura 3.3: Partes del captador solar.

- Receptor, formado por un tubo o varios tubos absorbedores, con o sin cubierta. El receptor se encuentra en un plano paralelo y superior a los



(a) Tubo absorbedor con cubierta de vidrio.



(b) Reflector secundario.

Figura 3.4: Partes del captador solar.

concentradores planos. Por el interior de los tubos absorbedores circula el fluido caloportador, en este caso agua presurizada. El tubo absorbedor se encuentra rodeado por una cubierta de vidrio para asegurar el vacío entre ambos, como se puede ver en la figura 3.4(a).

- Reflector secundario, consistente en una envolvente delgada de metal y un espejo montado dentro de dicha cubierta. Su misión es reflejar la radiación solar que no incide directamente sobre el receptor desde los espejos primarios, optimizando de este modo la eficiencia óptica del sistema (ver figura 3.4(b)).

- Estructura portante del conjunto. El captador solar se conecta con el resto del circuito hidráulico. La temperatura en el circuito hidráulico está limitada a un máximo de 200 °C y la presión a un máximo de 16 bar. La presión estándar de operación está limitada a 13 bar, y la válvula de liberación de presión está ajustada a 16 bar. El caudal nominal de agua será de 13 m^3/h .

A continuación se puede observar en la tabla 3.1 las principales características del sistema de captación solar.

Comparando los captadores solares tipo Fresnel con los captadores cilindro-parabólicos se pueden observar una serie de ventajas que se exponen a continuación:

- Espejos y sistema de seguimiento de bajo coste.
- Tubo absorbedor fijo, no se necesitan juntas de alta presión flexibles.
- No se necesitan tubos de vacío.

Extensión de terreno ocupada	480 m^2
Superficie reflectora total	352 m^2
Orientación de la planta	Este - Oeste
Número de líneas receptoras	1
Longitud línea receptor	64m
Tipo de receptor	De cavidad con reflector secundario y cubierta de vidrio.
Altura línea receptor	4 metros sobre los espejos.
Anchura del receptor	0.3 m
Tipo de absorbedor	Tubo de acero DIN 1.4541 (AISI 321): Acero inoxidable aúntenítico estabilizado
Fluido de trabajo	Agua
Generacion de vapor	No
Presión de diseño	13 bar
Número de filas de reflectores por línea de absorbedor	11 Filas
Longitud de cada módulo reflector	4 m
Anchura reflector	0.5 m
Número total de reflectores	176
Reflectividad	0.92
Relación de concentración	25

Tabla 3.1: Características del sistema de captación de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

- No se necesitan codos de expansión (el absorbedor está libre por un extremo para dilatarse).
- Reflectores planos y situados cerca del suelo, se reducen cargas de viento.
- Uso eficiente del suelo, las filas de colectores pueden situarse cerca una de la otra.
- Fácil acceso a las partes móviles y superficiales.

Se estima que la reducción de costes debido al uso de la tecnología Fresnel en comparación con los captadores cilindro-parabólicos, rondará el 50 % cuando la tecnología se haya desarrollado lo suficiente [3].

Sistema de Absorción

En el modo de refrigeración, la máquina de absorción transforma la energía térmica (agua caliente) en energía frigorífica empleada para enfriar el agua procedente de los equipos de acondicionamiento del edificio. Se basa en la transferencia de energía térmica desde un foco frío a otro caliente mediante la evaporación a baja presión de un fluido refrigerante.

La generación de fluido refrigerante (agua) y la regeneración del absorbente se realiza en 2 etapas distintas, de ahí la denominación de doble efecto. La diferencia entre el ciclo de simple efecto y el de doble efecto radica en la eficiencia, determinada por el COP (Coefficient Of Performance) o cociente entre el frío generado y la energía térmica consumida por la máquina. Son valores medios habituales un $COP = 0.6-0.7$ para simple efecto y $COP = 1-1.4$ para doble efecto.

En la figura 3.5 se ilustra dicho funcionamiento.

La solución concentrada de LiBr es aspirada desde el absorbedor y transportada hacia el generador de baja temperatura. Una vez allí hierve gracias al calor transferido por el refrigerante (vapor de agua) producido por el generador de alta temperatura, liberando vapor de agua y produciendo una solución de LiBr aún más concentrada, parte de la cual es aspirada por una bomba y transportada hasta el generador de alta temperatura y la otra parte vuelve de nuevo al absorbedor, pasando antes por un recuperador de baja temperatura donde es enfriada.

En el generador de alta temperatura esta solución concentrada hierve por el efecto de la fuente de calor externa, generando refrigerante a alta temperatura. Como hemos indicado anteriormente este vapor a alta temperatura pierde calor en el

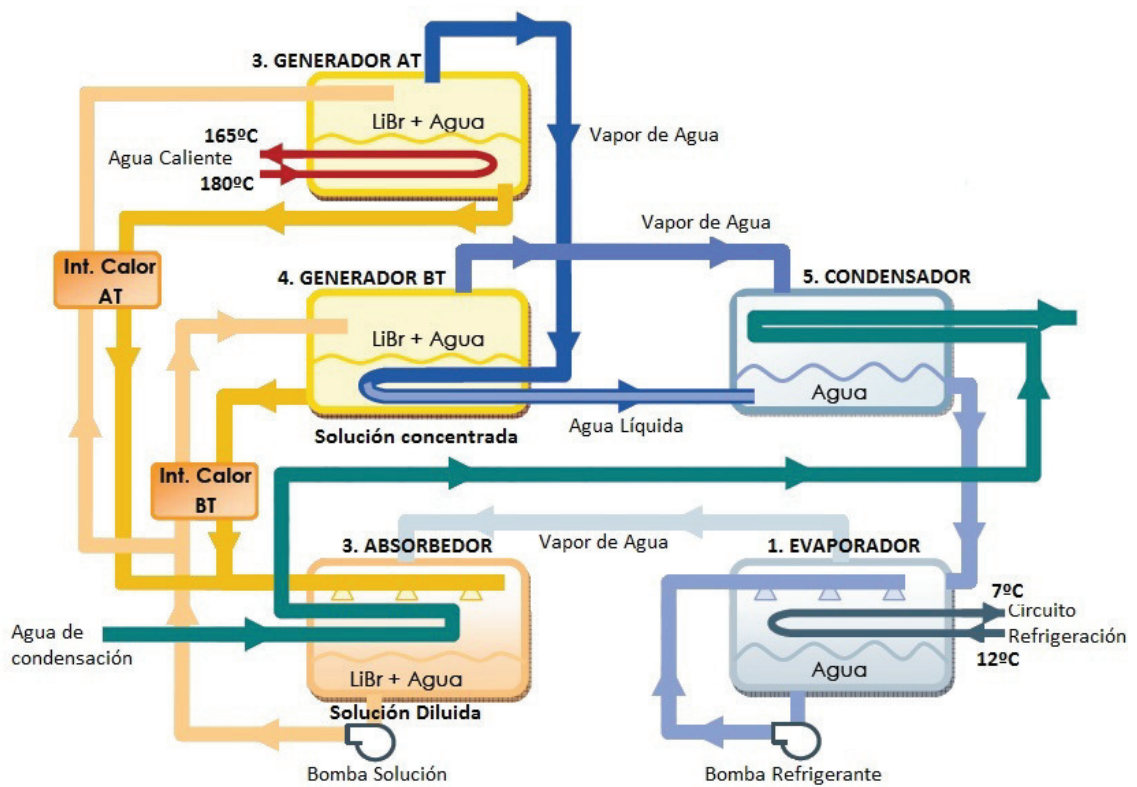


Figura 3.5: Esquema de funcionamiento de una máquina de absorción de doble efecto.



Figura 3.6: Máquina de absorción.

generador de baja temperatura, produciéndose una condensación parcial del mismo. Por tanto el generador de baja temperatura actúa también como condensador.

El vapor generado en el generador de baja temperatura fluye hacia el condensador donde cede calor latente al circuito de agua de refrigeración cambiando de estado (de vapor a líquido).

El refrigerante producido en los dos generadores, ya en estado líquido, es rociado mediante unos sprays sobre un intercambiador de tubos, por el interior de los cuales circula agua que es enfriada en este proceso. El agua rociada se evapora en este intercambio de calor, pasando de nuevo al absorbedor donde se encuentra con parte de la solución saturada procedente de los generadores, siendo absorbido por ésta [4].

Es una máquina de absorción de doble efecto con ciclo LiBr / agua modelo BROAD-BZH15 (ver figura 3.6). Tiene una potencia de refrigeración de 174 kW y un COP teórico de 1,34. Se acciona por agua sobrecalentada cuya temperatura tiene que encontrarse entre 145°C-165°C. Si no llega a esa temperatura se pone en funcionamiento el quemador de gas de este equipo para aportar la energía necesitada.

En las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 se pueden observar las características principales de la máquina de absorción que se encuentra en la planta de refrigeración solar por

absorción situada en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

GENERAL	
Fabricante	BROAD
Modelo	BZH151X
Tecnología	Doble efecto/ Ciclo LiBr/ Agua

Tabla 3.2: Características generales de la máquina de absorción.

MODO CALEFACCIÓN	
Potencia de Calefacción	135 KW
COP teórico en calor	0.925
Temperatura de impulsión de calor	65°C
Temperatura de retorno de calor	57°C
Caudal de calor	14.5 m ² /h
Combustible	gas natural

Tabla 3.3: Características principales del modo de calefacción de la máquina de absorción.

MODO REFRIGERACIÓN	
Potencia Frigorífica	174 KW
COP teórico en frío	1.34
Temperatura de impulsión de frío	7°C
Temperatura de retorno de frío	12°C
Caudal de frío	30 m ² /h
Temperatura de salida de condensación	37°C
Temperatura de entrada de condensación	30°C
Caudal de condensación	36.6 m ² /h
Combustible	gas natural

Tabla 3.4: Características principales del modo de refrigeración de la máquina de absorción.

Sistema de refrigeración

Como todos los equipos de este tipo, precisa de un sistema de disipación del calor generado en el absorbedor y condensador, para lo cual se utiliza una captación de agua del río Guadalquivir que actúa como sistema de refrigeración. De esta forma, se evita la instalación de torres de refrigeración, con los requerimientos de mantenimiento y costes asociados que éstas comportan.

Interconexión de equipos

En este proyecto han trabajado varias empresas: BROAD GROUP se ha encargado de la máquina de absorción, PSE del colector solar Fresnel y COFELY y Johnson Controls para la integración y monitorización de los distintos componentes.

El sistema de control es distribuido. Un controlador independiente, basado en PC 104 bajo Linux gobierna la acción de los espejos del captador solar tipo Fresnel, otro basado en la plataforma CJ de OMRON, para el control de la máquina de absorción de BROAD. Estos controladores están integrados en una plataforma METASYS de la empresa Johnson Control, compuesta por 3 controladores tipo FX¹(dos FX15 y un FX7) para el control de los circuitos hidráulicos y la captación de señales del sistema, una NAE (Network Automation Engines)² para la centralización de todas las señales y el desarrollo de programas de nivel superior, un sistema de integración (Integrator) con la máquina de absorción y un Gateway (PC 104) para la integración con el colector solar.

La comunicación de la NAE con los FX y el Integrator se realiza mediante bus N2 (de Johnson Control). El PC de los colectores, el Gateway y la NAE comunican mediante BacNET con TCP-IP. El Integrator comunica con el PLC de OMRON mediante el estándar ModBUS.

La NAE, el Gateway, el PC 104 para el captador solar y el PC de supervisión tienen un IP público para poder acceder a ellos desde la Red. En la figura 3.7 se muestra la interconexión de los distintos equipos en la Fase I.

A continuación se explicará con más detalle de qué se encargan los distintos controladores (ver figura 3.8).

Captador solar.

El gobierno de los espejos se realiza mediante un sistema basado en PC104 funcionando bajo Linux. El programa de control arranca automáticamente cuando se conecta el interruptor de marcha del cuadro eléctrico. Existe un sistema gráfico instalado en el cuadro que comunica con el programa de control y se usa como interfaz hombre-máquina (ver figura 3.9).

¹Para más información ver Apéndice A

²Para más información ver Apéndice B

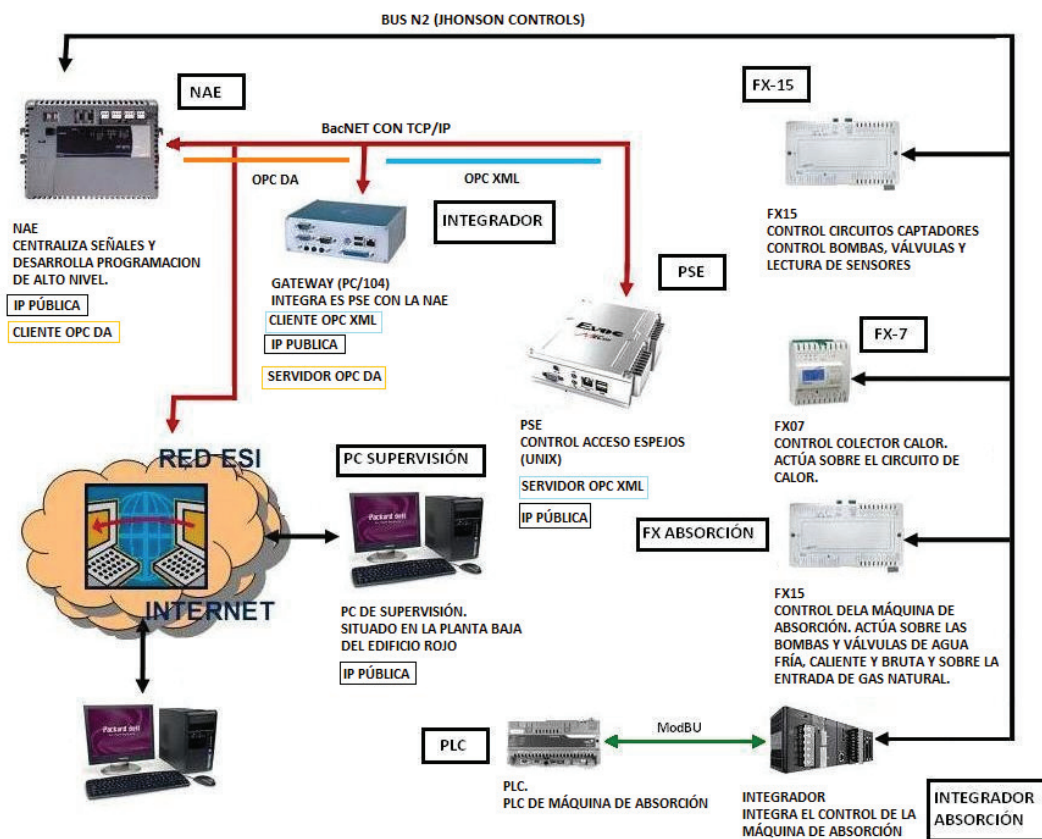


Figura 3.7: Esquema de conexionado de los equipos de la planta en la Fase I.

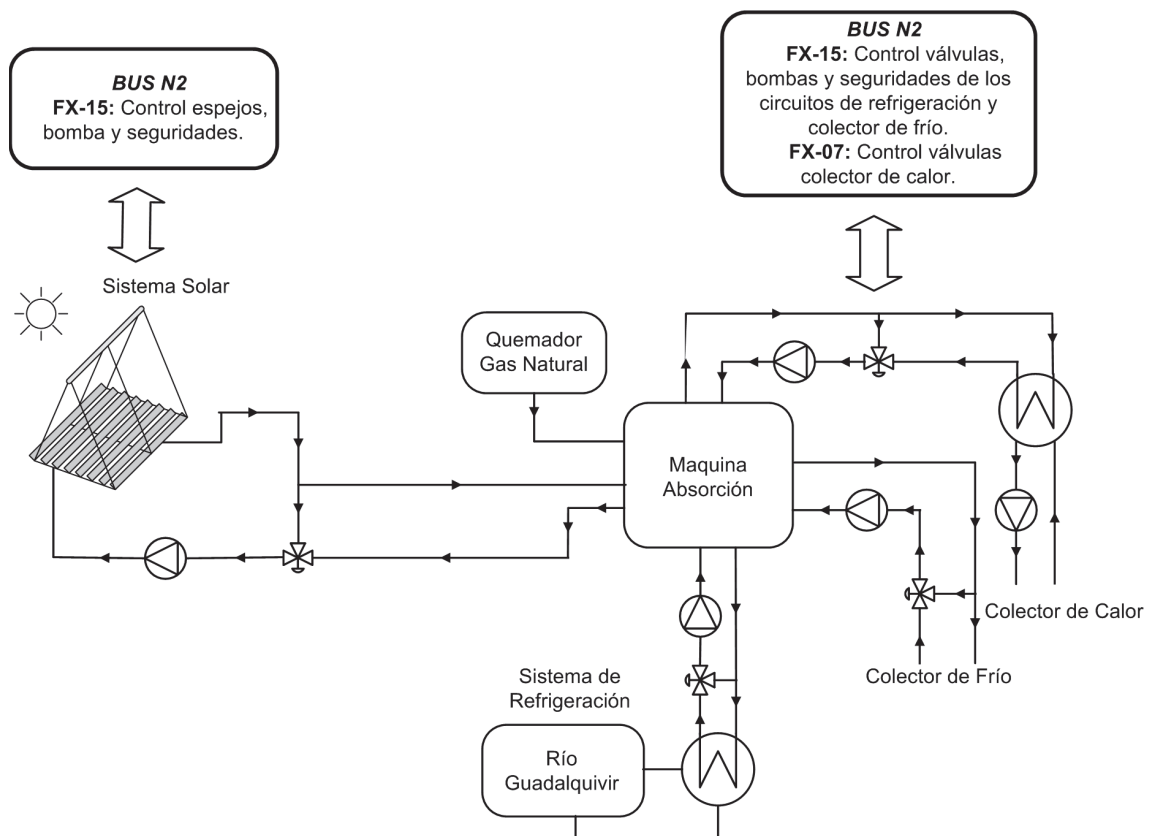


Figura 3.8: Esquema de la planta de la Fase I.

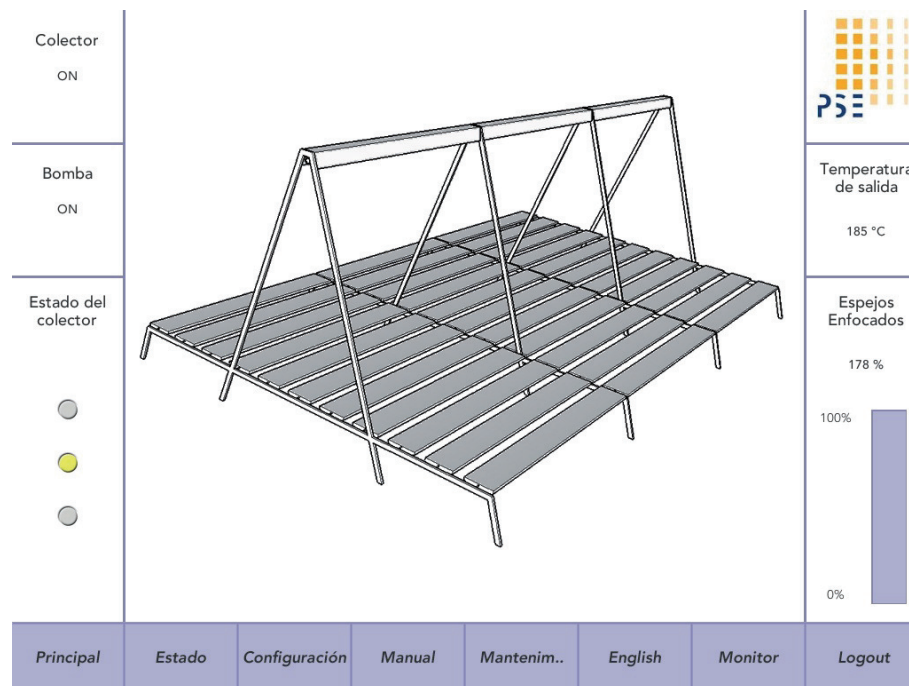


Figura 3.9: Interfaz gráfica del PC104.

El movimiento de los espejos se regula mediante motores eléctricos comandados por el sistema de control mediante interfaces de potencia y comunicados por buses, los cuales soportan las señales de los motores.

Para la integración con el sistema METASYS, se ha usado un Gateway basado en un microPC que lee, mediante OPC, los datos del PC104 y los suministra a la NAE via BacNET. El Gateway se ha tenido que instalar puesto que el PC104 y la NAE hablaban versiones diferentes de OPC (NAE cliente OPC DA y el PC104 servidor OPC XML). El Gateway hace de “traductor” de OPC para que el control de acción de los espejos se pueda comunicar con el sistema de centralización (NAE).

En la zona de los paneles solares, hay un controlador FX-15, de Johnson Control. Está dedicado al control de las bombas y válvula, así como a la lectura de los sensores, incluidos los de la estación meteorológica.

Máquina de absorción.

La máquina de absorción es controlada por un autómata programable OMRON CJ1. La integración con el sistema de control general es mediante un Integrator

de Johnson Control y comunicación ModBUS. Existe un gateway que comunica mediante Modbus con la máquina de absorción, y a la vez este gateway se comunica con un integrator que va conectado a nuestro bus de comunicaciones Bus N2, y funciona como un equipo más.

Además de la integración, hay dos controladores: un FX-07 que se encarga de las variables relacionadas con el colector de calor situado en el sótano del edificio y un FX-15 que actúa sobre las bombas de agua de los circuitos de agua fría, caliente y agua bruta, así como en las válvulas asociadas y en la entrada de gas natural. Este controlador recoge también todos los datos de sensores de temperatura y caudal de todos los circuitos asociados.

3.2. Segunda fase

La ampliación que se realiza en esta parte del proyecto consiste en la inclusión de un sistema de acumulación PCM para optimizar el uso de la energía solar. En ciertas épocas del año, a ciertas horas del día, en la Fase I se tenía que desenfocar espejos debido que se llegaba a temperaturas por encima de la de funcionamiento. Esa energía se desperdiciaba. Con la ampliación esa energía no se desperdicia, se almacena en el tanque de almacenamiento para momentos donde no se puede llegar a las temperaturas de funcionamiento debido a la baja radiación o a nubes.

En la figura 3.10 se pueden observar los esquemas de la Fase II. Se ha incluido un nuevo sistema de tuberías con varias válvulas de tres vías y un tanque de acumulación. Con el nuevo sistema de tuberías se puede obtener varios modos de funcionamiento, dependiendo si se necesita incluir en el sistema el tanque de acumulación, o si hay que recircular el agua para un precalentamiento antes de introducirla en la máquina de absorción.

Sistema solar.

La única novedad con respecto a la Fase I en el sistema solar es la inclusión de un pirheliómetro para poder recoger datos de radiación directa puesto que en la estación meteorológica instalada en la Fase I no se recogen esos datos.

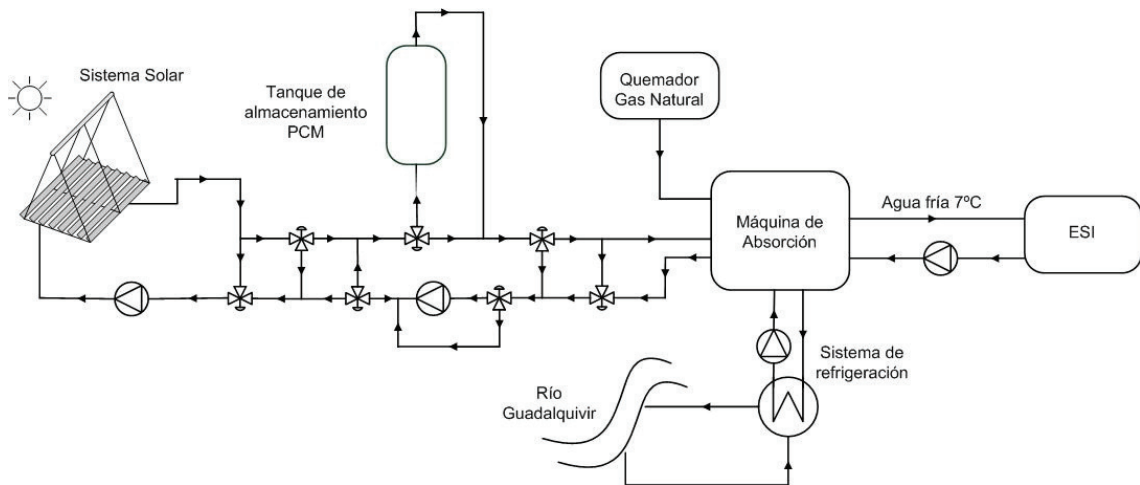


Figura 3.10: Esquema general de la planta de la Fase II.

Sistema de absorción.

Debido a que los caudalímetros instalados en la Fase I no tenían la precisión deseada, eran contadores de pulsos, en esta fase se han sustituido los caudalímetros por contadores de energía.

Sistema de almacenamiento.

En dicha planta se ha instalado también un sistema de almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase para los momentos en que existe exceso de producción solar, de forma que pueda utilizarse la energía almacenada en los momentos que la temperatura de los captadores solares esté por debajo de la deseada debido a la baja radiación.

El acumulador PCM es un tanque de 18 m de largo y 1.31 m de diámetro (Ver figura 3.11). La energía térmica se almacena casi isotérmicamente como calor latente de un cambio de fase de transición sólido - líquido, es decir, como calor de fusión. Sustancias con estas características son llamados materiales de cambio de fase (PCM). El tanque de almacenamiento usa Hidroquinona como PCM porque la temperatura de fusión es de 170.3 °C, la cual se sitúa dentro del rango de funcionamiento de la máquina de absorción (145°C-170°C).

El tanque de almacenamiento es un intercambiador de calor carcasa-tubo. Consiste en una serie de tubos que contienen el fluido caloportador y el PCM rellena el espacio entre los tubos y la carcasa. En la tabla 3.5 se pueden ver algunas



Figura 3.11: Tanque de almacenamiento PCM.

características del tanque de almacenamiento.

Interconexión de equipos

En este apartado se describirá qué equipos interconexionan y controlan las distintas partes de la planta. En la figura 3.12 se muestra la interconexión de los distintos equipos en la Fase II.

Como se puede observar se ha incluido un nuevo bus de comunicaciones (bus LON). Este bus se ha incluido para la comunicación con los nuevos caudalímetros y los nuevos controladores FX. Para la incorporación de este nuevo bus de comunicaciones se ha tenido que sustituir el modelo de la NAE. En la Fase I se tenía una NAE-45 que sólo soportaba un bus de comunicaciones (bus N2). Al introducir un nuevo bus se ha sustituido por una NAE-55, la cual puede tener simultáneamente varios buses (Bus N2 y bus LON).

A continuación se explicará con más detalle las modificaciones que se han realizado en los distintos sistemas de la planta (ver figura 3.13).

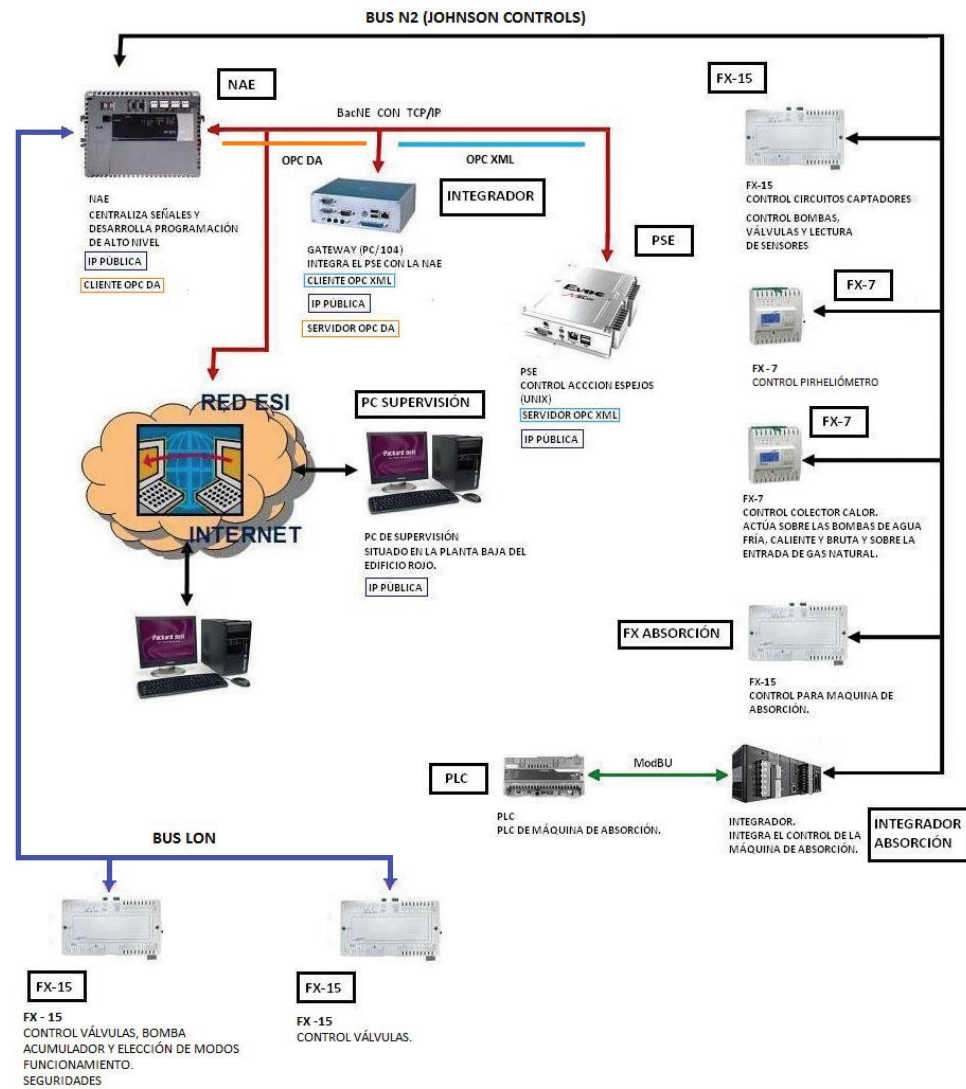


Figura 3.12: Esquema de conexionado de los distintos equipos de la planta solar de refrigeración por absorción.

Acumulador	
Peso vacío	4100 Kg
Peso lleno de agua	8150 Kg
Carcasa	HIDROQUINONA
Temperatura de fusión	170.3°C
Temperatura de diseño	200°C
Presión de diseño	1 bar
Volumen	3300 litros
Tubos	AGUA PRESURIZADA
Temperatura de diseño	200°C
Presión de diseño	15 bar
Volumen	750 litros

Tabla 3.5: Características principales del acumulador.

Captador solar.

En la zona de los paneles solares, se ha incluido un nuevo controlador: un FX-07. Dicho controlador está dedicado al control del perheliómetro que se instaló en la Fase II del proyecto puesto que en la estación metereológica no se obtenía la radiación directa.

Sistema de Absorción.

Se han cambiado los caudalímetros de la Fase I (contadores de pulso) por unos contadores de energía debido a que éstos (contadores de pulsos) no proporcionaban la precisión deseada. Se han tenido que implementar en el bus LON en vez de directamente introducir las señales en el controlador FX-15. Ahora el traspaso de variables se hace a través de la NAE.

Sistema de acumulación

La implementación del sistema de acumulación se realiza a través de 2 controladores FX-15: uno actúa sobre varias válvulas y la bomba del acumulador, además de recoger los datos de temperatura externa e interna del tanque de acumulación y el otro se encarga de actuar sobre el resto de válvulas. Estos controladores se conectan a la NAE a través del bus LON.

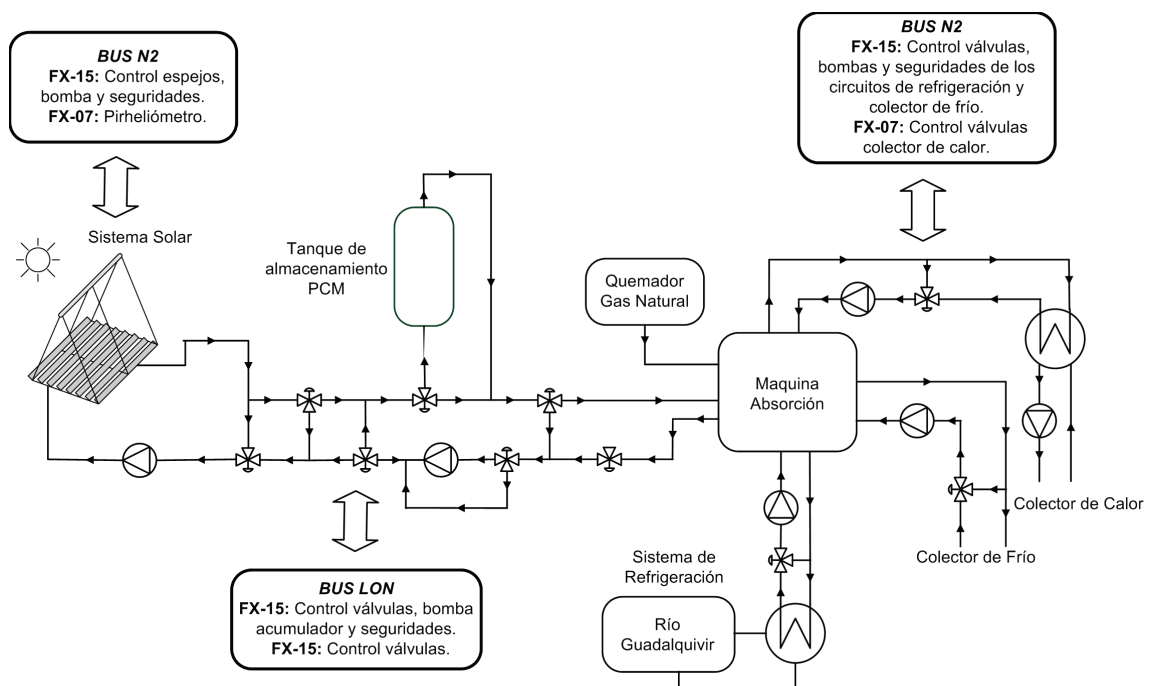


Figura 3.13: Esquema general de la planta con los distintos controladores.