

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y FACULTAD
DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL

Diseño e implementación de
herramientas software para el
desarrollo de estrategias de control en
el campo de helióstatos de la PSA

Curso 2012/2013

Alumno/a:

Jesús Valero Muñoz

Director/es:

Dr. José Luis Guzmán Sánchez



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y FACULTAD
DE CIENCIAS EXPERIMENTALES
Departamento de Informática



TRABAJO FIN DE MÁSTER
MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL
POSGRADO EN INFORMÁTICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS
SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE
ESTRATEGIAS DE CONTROL EN EL CAMPO DE
HELIOSTATOS DE LA PSA

Jesús Valero Muñoz

Dirigido por: Dr. José Luis Guzmán Sánchez

Almería, Septiembre 2013

TRABAJO FIN DE MÁSTER
MÁSTER EN INFORMATICA INDUSTRIAL
POSGRADO EN INFORMATICA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS
SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE
ESTRATEGIAS DE CONTROL EN EL CAMPO DE
HELIOSTATOS DE LA PSA**

por
Jesús Valero Muñoz

Para la obtención del
Título del Máster en Informática Industrial
Postgrado en Informática

Director

Autor

Dr. José Luis Guzmán Sánchez

Jesús Valero Muñoz

Este trabajo esta dedicado a todas las personas que creyeron en mí, estuvieron siempre a mi lado y han hecho posible esta realidad gracias a su cariño, apoyo y comprensión.

Muy especialmente a M^a José y Dani ... os quiero.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que compartieron este sueño junto a mí, que me apoyaron y confiaron en que un día como hoy se podría hacer realidad.

De manera muy especial a mi esposa por recordarme que siempre puede haber otro punto de vista a considerar, a mi hijo por recordarme que la curiosidad es la que mueve el mundo, a mi madre por ser la única persona que a estas alturas aún consigue sacarme los colores, a mi hermana por ser ejemplo de superación, a toda mi familia por estar ahí en todo momento ... todas ellas personas incondicionales en mi vida.

Este trabajo ha sido realizado gracias a la inestimable colaboración y apoyo de los departamentos de Instrumentación y DAS, Mantenimiento y Operación de la Plataforma Solar de Almería, así mismo ha sido realizado gracias a los responsables de la instalación TSA-SOLAIR y del campo de heliostatos del CESA-1. Gracias por su apoyo y paciencia en la realización de este trabajo.

Un agradecimiento infinito al Dr. José Luis Guzmán Sánchez, director del presente trabajo fin de máster, y por último a Ginés García Navajas, un gran jefe, un gran profesional y sobre todo una grandísima persona.

A todos ellos y a ti, muchas gracias.

La habilidad es lo que permite hacer ciertas cosas.
La motivación determina lo que se hace.
La actitud cuán bien se hace.

Lou Holtz

**Diseño e implementación de herramientas software para el
desarrollo de estrategias de control en el campo de
helióstatos de la PSA**

INDICE

I. Introducción	1	VI. Sistema de control del receptor central	35
II. Descripción general de un sistema de receptor central	4	VI-A. Requisitos básicos de implementación	35
II-A. Campo de helióstatos	4	VI-B. Diseño del CRCS	35
II-B. Receptor solar	5	VI-C. Implementación del CRCS	37
II-C. La torre	6	VI-D. Diagrama de bloques del CRCS	40
II-D. Sistema de control	7	VI-E. Resultados obtenidos con el CRCS	41
II-E. Sistema de almacenamiento térmico	7	VII. Conclusiones	44
II-F. Sistema de producción de potencia	7	VII. Futuros trabajos	44
II-G. Sistema auxiliar	7	VIII. Referencias	45
II-H. Sistema SCADA	7		
II-I. Desarrollo de un SCADA con LabVIEW	8		
III. Descripción de las actuales instalaciones	9		
III-A. La instalación CESA-I de 7 MWt	9		
III-B. Campo de helióstatos CESA-I	9		
III-C. Receptor solar y sistema de potencia	10		
III-D. Descripción de los helióstatos	11		
III-E. Control local	11		
IV. Descripción de los actuales sistemas de control	13		
IV-A. Sistema de control del campo de helióstatos	13		
IV-A1. Objetivos del actual HFCS	14		
IV-A2. Aspectos de implementación	14		
IV-A3. Objetos helióstatos	15		
IV-A4. Los módulos de comunicaciones	16		
IV-A5. Interfaz de operador	17		
IV-A6. Distribución de objetos	18		
IV-A7. Deficiencias del actual CRCS	18		
IV-B. Sistema de control del receptor central	18		
IV-B1. Señales del sistema	19		
IV-B2. Esquema del sistema	19		
IV-B3. Descripción de las señales de entrada	19		
IV-B4. Descripción de las señales de salida	20		
IV-B5. Control del sistema TSA	21		
IV-B6. Deficiencias del actual CRCS	22		
V. Sistema de control del campo de helióstatos	22		
V-A. Requisitos básicos de implementación	23		
V-B. Control de Comunicaciones del Campo de Helióstatos	24		
V-C. Diseño del HFCS	25		
V-D. OPC	26		
V-E. Implementación del servidor OPC-DA	27		
V-E1. Estructura del servidor OPC-DA	28		
V-E2. Implementación del servidor OPC-DA compacto	29		
V-E3. Implementación del servidor OPC-DA extendido	30		
V-F. Implementación del HFCS	31		
V-G. Resultados obtenidos con el HFCS	33		

Diseño e implementación de herramientas software para el desarrollo de estrategias de control en el campo de helióstatos de la PSA

Jesús Valero Muñoz

Master en Informática Industrial

Postgrado en Informática

Escuela Politécnica Superior y Facultad de Ciencias Experimentales

Universidad de Almería

Abstract — Solar applications at high temperatures require high solar concentration, which is achieved using large solar reflectors so-called heliostats, which reflect and concentrate the solar radiation on to a system located at the top of a tower and formed by the receiver (or solar absorber) and the power stage. This system is in charge of transferring the solar thermal energy to conventional systems of electricity generation, producing steam and sending it to a turbine. For this reason, this power generation plants are known as Central Receiver Systems (CRS).

The installation of the TSA Project (Technology Program Solar Air Receiver) at PSA is formed by two main subsystems: the Heliostats Field Control System (HFCS) and the Central Receiver Control System (CRCS). On the one hand, the main purpose of the HFCS is to generate an even distribution in space and time of the temperature or radiation in the central receiver, for that the HFCS will position each heliostat of the field in the required operating position. On the other hand, the main purpose of the CRCS is to regulate the pressure and the temperature of the steam generated in the heat exchanger. For that, the CRCS will set the required orders to the solar receiver and the power stage. The present TSA control system is implemented with two central controls, one devoted to HFCS and the other to CRCS. This scenario is sufficient to operate the system, but the lack of total communication between both subsystems makes impossible to approach more complex control strategies. To this, we must add the fact that the local controls of the heliostats field are currently being replaced by modern ones, so in a short term the current HFCS will be obsolete and the urgent need to develop a new HFCS to drive new local controls arises.

To make up for this lack, the present work approaches the implementation of a new HFCS and the modification of the current TSA control system allowing the communication and information transfer between the two main subsystems forming the TSA system. It is intended that the central control system can develop control strategies allowing the automatic coordination of the different focusing strategies of the HFCS heliostats and automatic operation of the CRCS.

Keywords — *Central receiver system, heliostat, field bus, data bus, distributed control system, control strategies, OPC, SCADA.*

Resumen — Las aplicaciones solares en alta temperatura requieren una gran concentración solar, lo que se consigue mediante el empleo de grandes reflectores denominados helióstatos, que reflejan y concentran la radiación solar en lo alto de una torre en donde esta situado el sistema formado por un receptor solar (o absorbedor solar) y su etapa de potencia. Este último sistema es el encargado de transferir la energía térmica del Sol a sistemas convencionales de generación de electricidad, produciendo vapor que

luego será enviado a una turbina. Por este motivo, estas plantas de producción son conocidas mediante la denominación de Sistemas de Receptor Central (CRS).

La instalación del proyecto TSA (Programa de Tecnología de Receptor Solar de Aire) situado en la PSA esta formado por dos subsistemas principales: el Sistema de Control del Campo de Heliostatos (HFCS) y el Sistema de Control del Receptor Central (CRCS). Por un lado el objetivo principal del HFCS es generar una distribución de temperatura o radiación uniforme en espacio y tiempo en el receptor central, para lo cual el HFCS posicionará cada helióstato del campo en las posiciones de operación necesarias. Por otro lado el objetivo principal del CRCS es regular la presión y la temperatura del vapor generado en el intercambiador de calor, para lo cual el CRCS establecerá las consignas necesarias en los elementos del receptor solar y de su etapa de potencia. El actual sistema de control del TSA esta implementado mediante dos controles centrales, uno dedicado exclusivamente al HFCS y otro al CRCS. Este escenario es más que suficiente para operar el sistema, pero la ausencia de comunicación completa entre ambos subsistemas imposibilita el planteamiento de estrategias de control más complejas. A este hecho debemos añadir que el campo de helióstatos del sistema está actualmente en plena fase de sustitución de sus controles locales por otros más modernos, por lo que a corto plazo el actual HFCS quedará obsoleto y surge la necesidad imperiosa del desarrollo de un nuevo HFCS que pueda gobernar estos nuevos controles locales.

Para subsanar estas carencias se aborda en este trabajo la implementación de un nuevo HFCS y la modificación del actual sistema de control del proyecto TSA para permitir la comunicación y trasiego de información entre los dos subsistemas principales que forman el sistema de TSA. Con ello se pretende que el sistema de control central tenga la posibilidad de poder desarrollar estrategias de control que permitan la coordinación automática de las distintas estrategias de apunte de los helióstatos del HFCS y de las distintas estrategias de control y automatización de operación en el CRCS.

Palabras Clave — *Sistema de receptor central, helióstato, bus de campo, bus de datos, sistema de control distribuido, estrategias de control, OPC, SCADA.*

I. INTRODUCCIÓN

La termosolar de receptor central es una tecnología cara en la actualidad, pero la única de futuro a partir de energía solar capaz de sustituir plenamente a las plantas energéticas de combustibles convencionales (fuel-oil, ciclos combinados, nucleares), ya que la fotovoltaica, por su tamaño, no tiene potencia para abastecer, por ejemplo, a ciudades completas.



Figura 1.1. Vista aérea de las principales instalaciones de ensayo de la PSA.

Los sistemas de receptor central de una planta solar pueden descomponerse someramente en dos subsistemas. Por un lado el campo de heliostatos y por otro el receptor junto al sistema de potencia [6]. La función principal del campo de heliostatos es la de reflejar y concentrar la radiación solar incidente sobre el campo en unos puntos determinados dentro del receptor [1]. El funcionamiento del sistema de receptor central precisa que cada uno de los heliostatos se posicione de forma que se cree una distribución espacial de la radiación solar reflejada dentro del receptor según las necesidades del sistema de potencia. La dependencia temporal que existe en los sistemas de energía solar (la intensidad de la radiación varía a lo largo del día) y las perturbaciones (por ejemplo, por presencia de nubes) dificultan su control y exigen una respuesta en tiempo real. Aparte, se necesita un Sistema de Control para el Receptor y Sistema de Potencia cuyo cometido es el de regular la presión y temperatura del vapor generado por el receptor solar para la producción de energía [2,3,3b].

La PSA, situada en el desierto de Tabernas (Almería), donde el número de horas de sol al año es de los más altos de toda Europa, pertenece al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales Tecnológicas (CIEMAT). Es uno de los mayores centros de investigación del mundo en temas relacionados con las tecnologías solares de concentración (ver figura 1.1).

La PSA cuenta, entre sus muchas instalaciones de ensayo, con dos instalaciones de Sistemas de Receptor Central: CESA-I (7 MWt) y SSPS-CRS (2,7 MWt) [5]. Estas dos instalaciones son excepcionales para el ensayo y validación de componentes y aplicaciones con tecnología de receptor central, permitiendo abordar proyectos y validar tecnologías en el rango de los cientos de kilovatios a varios megavatios. Son por tanto dos laboratorios a intemperie especialmente acondicionados para escalar y cualificar sistemas en su fase previa a la etapa de demostración comercial.

El campo CESA-I (figura 1.2) fue inaugurado en 1983 y opera como instalación para ensayos de componentes relacionados con la energía solar (heliostatos, receptores, etc.). Este campo, de 330 por 250 m., dispone de 300 heliostatos de $39,6 \text{ m}^2$ de superficie, distribuyéndose en 16 filas. La torre, de hormigón, tiene una altura de 84 m, donde hay tres niveles de

ensayo: un horno solar para materiales a 45m, una sección para ensayo de receptores volumétricos presurizados a 60 m y el nivel para ensayos de receptores volumétricos atmosféricos en la parte superior a 80 m.

La planta SSPS-CRS (figura 1.3) fue inaugurada en 1981. Actualmente es una instalación de ensayos dedicada a la prueba de pequeños receptores. El campo está formado por 91 heliostatos de $39,3 \text{ m}^2$ de superficie. Existe un segundo campo, al norte de éste, con 20 heliostatos de 52 m^2 y 65 m^2 . Dispone de una torre metálica de 43 m de altura y tiene dos plataformas de ensayo. La primera plataforma, ocupando dos niveles a 32 m y 26 m de altura, está preparada para acoger ensayo de nuevos receptores para aplicaciones químicas. La segunda se encuentra a 43 m de altura y es utilizada para la evaluación de pequeños receptores volumétricos a presión atmosférica.

En las figuras 1.1 y 1.4 se puede ver la localización exacta de estas dos instalaciones dentro de la PSA. En el campo CESA-I, todos los heliostatos dependen de un control central con el que deben comunicarse regularmente mediante 16 líneas de comunicaciones que recorren el campo, a través de las cuales se especifican las consignas que deben alcanzar. En el campo SSPS-CRS, a diferencia del campo CESA-I, se utilizan comunicaciones inalámbricas y los heliostatos siguen de forma automática al sol por medio de algoritmos implementados en un microcontrolador que constituye el control local de los mismos [4], lo que permite independizarlos un poco del control central, el cual tendrá una función más orientada a la



Figura 1.2. Vista lateral de la instalación CESA-I con los heliostatos enfocando al nivel intermedio de ensayos (60 m.)



Figura 1.3. Vista aérea de la instalación SSPS-CRS con los heliostatos enfocando al nivel superior de ensayos (43 m.)

supervisión [29]. En ambos casos un sistema de control central se encarga de establecer una estrategia de apunte de grupos de helióstatos sobre determinados puntos del receptor solar para conseguir unas distribuciones de temperatura y flujo determinadas [7, 8]. Por otra parte, en ambas instalaciones otro sistema de control central es el encargado de la etapa de automatización de la operación con la planta de receptor central [6]. A través del receptor volumétrico, circula aire impulsado por una soplante que se calienta y posteriormente transfiere su energía para producir vapor en un intercambiador de calor.

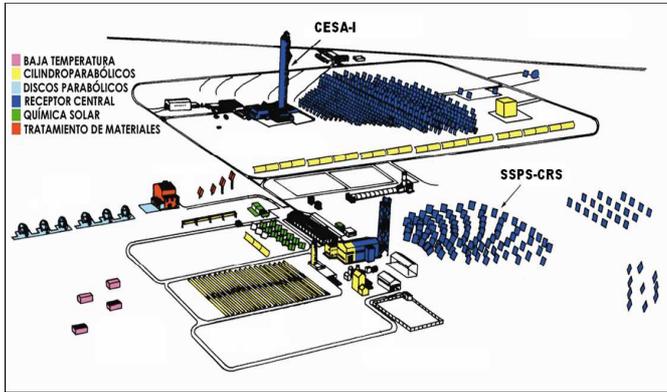


Figura 1.4. Localización de las principales instalaciones de ensayo de receptor central de la PSA.

El grupo de investigación “Automática, Electrónica y Robótica” (AER, código TEP-197 del Plan Andaluz de Investigación) de la Universidad de Almería (UAL) realizó el proyecto de investigación titulado “Desarrollo de sistemas y herramientas de control para plantas termosolares” (bajo el convenio PSA-UAL-AER). Entre los objetivos de este proyecto se encontraba el desarrollo de un HFCS (Sistema de Control de Campos de Helióstatos) para implantarlo en los dos campos de helióstatos de la Plataforma Solar de Almería (PSA-CIEMAT) [17,18]. Este nuevo HFCS sustituyó en el año 2003 a una aplicación existente situada en un μ VAX programada en el lenguaje FORTRAN, que con el paso del tiempo se volvió obsoleta.

En la actualidad el HFCS utilizado es un sistema de control comercial basado en tiempo real [7], desarrollado por una spin-off del CIEMAT [19], consecuencia directa del relevo al proyecto anteriormente mencionado del grupo de investigación AER y todo ello con el auspicio del CIEMAT y de la PSA. No obstante, al igual que pasó con el primer HFCS, de aquí a corto plazo dejará de ser operativo cuando finalice la instalación de los nuevos sistemas de control locales integrados en los helióstatos del campo CESA-I basados en Modbus. Por este motivo se hace necesaria la implementación de un nuevo HFCS que controle los nuevos controles locales, definiéndose de esta forma el primer objetivo a cubrir en este proyecto.

Por otro lado en paralelo al desarrollo de la aplicación para el control de campos de helióstatos, el grupo de investigación “Automática, Electrónica y Robótica” de la UAL realizó por el año 2003 el proyecto dedicado a la implementación de una aplicación para el control del receptor y sistema de potencia [16], el cual ha sido desarrollado usando LabVIEW [11,12] de National Instruments. Hasta la fecha este SCADA [13,14] cumplía perfectamente con las especificaciones establecidas en

su momento para el control del sistema, no obstante esas condiciones han cambiado como consecuencia de la actual remodelación de la etapa de potencia en la instalación. A priori se espera que este hecho tenga como consecuencia directa la adaptación del SCADA a la nueva situación mediante el reajuste de las señales de instrumentación afectadas por esta remodelación, y adicionalmente esta problemática conllevará la revisión de los cuatro principales lazos de control encargados de regular la producción en el sistema TSA.

Junto a este motivo, más que suficiente para justificar la modificación del actual SCADA del TSA, hay que añadir una carencia apuntada por los responsables de la instalación en relación a la ausencia de control y/o comunicación directa con el campo de helióstatos desde el actual SCADA, carencia que quedará cubierta por el primer objetivo de este trabajo. Pero lo verdaderamente interesante es el planteamiento de otra carencia considerada desde el principio de gran interés para los responsables de la instalación, siendo esta la de poder añadir al sistema TSA la posibilidad de poder ejecutar algoritmos de control (lazos de control) desarrollados por los especialistas en ingeniería de control de forma sencilla para estos. Por este motivo se hace necesaria la implementación de un nuevo CRSC que permita desarrollar estrategias de control en el campo de helióstatos, definiéndose de esta forma el segundo objetivo a cubrir en este proyecto

Inicialmente el SCADA del TSA es el elegido para integrar todas las nuevas funcionalidades propuestas para la mejora del sistema, ya que es el único de todo el sistema que actualmente es susceptible de modificación al disponerse de su código fuente desarrollado en LabVIEW. Pero el planteamiento final se realiza de forma distribuida para que tanto el HFCS como el CRSC puedan ser ejecutados en otros ordenadores distintos al que alberga el SCADA del TSA, dependiendo de la potencia de cálculo disponible, el número de líneas de comunicaciones del campo, el número de helióstatos, etc.

Como puede deducirse de las consideraciones expuestas anteriormente, el primer objetivo de este trabajo es *actualizar el sistema de adquisición de datos y control del proyecto TSA para adaptarlo a las nuevas necesidades de operatividad del campo de helióstatos* como consecuencia del cambio de los sistemas de control local de los mismos. De esta forma se plantea un nuevo bus de campo basado en el estándar industrial Modbus para el bus de campo [9] y en OPC para el bus de datos [10], estableciéndose una nueva forma de estrategia de comunicación entre los distintos elementos que componen el sistema [15]. Esta nueva forma de estrategia de comunicación facilitará la consecución del segundo objetivo marcado para este trabajo, *la posibilidad de integrar dentro del SCADA actual del TSA las herramientas software necesarias para poder desarrollar estrategias de control de forma fácil y rápida*, basadas en el desarrollo de controles individuales que podrán ser dinámicamente invocadas según los objetivos y necesidades de operación. Con todo ello se conseguirá integrar de forma fácil y dinámica, a nivel individual o colectivo, todas las estrategias de control que han sido estudiadas, desarrolladas y probadas en las instalaciones del campo CESA-I a lo largo de todos estos años desde su inauguración en el año 1983, tanto a nivel particular al proyecto TSA como a un nivel general para cualquier otro proyecto desarrollado en las distintas cotas de la torre CESA-I o de cualquier otro que necesite un control del

campo de helióstatos. Para mayor información al respecto se puede consultar las referencias 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 y 28.

La estructura de este trabajo se presenta de la siguiente forma. La sección II titulada “Descripción general de un Sistema de Receptor Central (SRC)” da un repaso a los componentes principales que forman un SRC, desde el campo de helióstatos hasta el sistema de control, pasando por el receptor central y la torre. En la sección III nombrada “Descripción de las actuales instalaciones”, y aprovechando los conceptos expuestos en la sección II, se describe los actuales instalaciones de obra civil, esquemas de control y subsistemas concebidos para operar la planta solar de receptor central del sistema TSA de la PSA, caracterizados porque la fuente de energía (radiación solar) no puede ser manipulable y está sujeta a cambios provocados por el ciclo solar diario y el paso de nubes. En la sección IV de título “Descripción de los actuales sistemas de control” se describirán los actuales sistemas de control implementados para el Campo de Helioestatos (HFCS) de la instalación CESA-I y para el Receptor Central (CRCS) del proyecto TSA, se reflejarán las características principales de cada uno y se expondrán los motivos por los que se hace necesario la implementación de un nuevo HFCS y la modificación del actual CRCS. En la sección V titulada “Diseño del Sistema de Control del Campo de Helioestatos (HFCS)” se reflejarán los requisitos básicos de implementación para el nuevo sistema de control, se expondrá la solución planteada basada en los protocolos de comunicaciones Modbus [9] y OPC [10] y por último se describirá la nueva implementación del HFCS junto con los resultados de fiabilidad y robustez obtenidos en los primeros ensayos. En la sección VI de nombre “Diseño del Sistema de Control del Receptor Central (CRCS)” se reflejarán los requisitos básicos que se han de incorporar al sistema de control, se describirá más en detalle la forma en la que se ha integrado los mecanismos necesarios para poder establecer la comunicación y trasiego de información entre sus distintos subsistemas, se expondrá la solución planteada basada en el protocolo de comunicaciones OPC [10] y por último se describirá la nueva implementación del CRCS junto con los resultados obtenidos en los primeros ensayos. Por último en las secciones VII y VIII se muestran conclusiones, posibles mejoras y trabajos futuros.

II. DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN SISTEMA DE RECEPTOR CENTRAL

Un Sistema de Receptor Central (SRC) es un sistema termosolar de concentración en el que el sistema colector está compuesto por un grupo, más o menos numeroso, de concentradores individuales llamados helióstatos, que dirigen la radiación solar concentrada hacia un receptor central, normalmente situado a una cierta altura sobre el suelo en una torre.

Los componentes principales de un SRC son: a) El sistema colector o campo de helióstatos; b) El receptor; c) La torre (puede no existir); d) El sistema de control.

Además de los anteriores, en una central termoeléctrica de receptor central existen otros componentes o subsistemas, como son: a) El sistema de almacenamiento térmico (puede no existir); b) El sistema de producción de potencia; c) El sistema auxiliar

II-A. Campo de Helioestatos

Su función es la de concentrar la radiación solar y dirigirla hacia el receptor. El diccionario de la Real Academia de la Lengua define helióstato como: “Aparato que, mediante un servomecanismo, hace que un espejo siga el movimiento diurno del Sol, recogiendo así la máxima energía para su utilización calorífica”.

Por tanto un helióstato está formado por una superficie reflectante (un espejo), una estructura soporte (formada por cerchas metálicas normalmente), un pedestal de cimentación, unos mecanismos de movimiento (servomecanismos) y un sistema de control [4].

El sistema de control mantiene de manera continua, actuando sobre el servomecanismo de elevación y azimut, la superficie reflectante de forma que la reflexión de la radiación solar directa que incide sobre ella sea dirigida al receptor solar.

Cada helióstato convencional está formado por múltiples módulos de espejos, llamados facetas, los cuales se pueden apreciar en la figura 2.1. Cada faceta tiene, normalmente, una ligera curvatura cóncava y también se inclinan respecto al plano de la estructura de soporte para conseguir de esta forma un mejor enfoque de la radiación solar reflejada en el receptor.



Figura 2.1. Helioestato de 120 m² diseñado por Solúcar S.A.

En cuanto a la evolución de las diferentes tecnologías de construcción de helióstatos, las superficies reflectantes más empleadas hasta hoy son a base de espejos de vidrio, aunque también se han empleado superficies reflectantes a base de películas poliméricas de alta reflectividad. El mayor inconveniente para la introducción de esta última tecnología es su menor durabilidad.

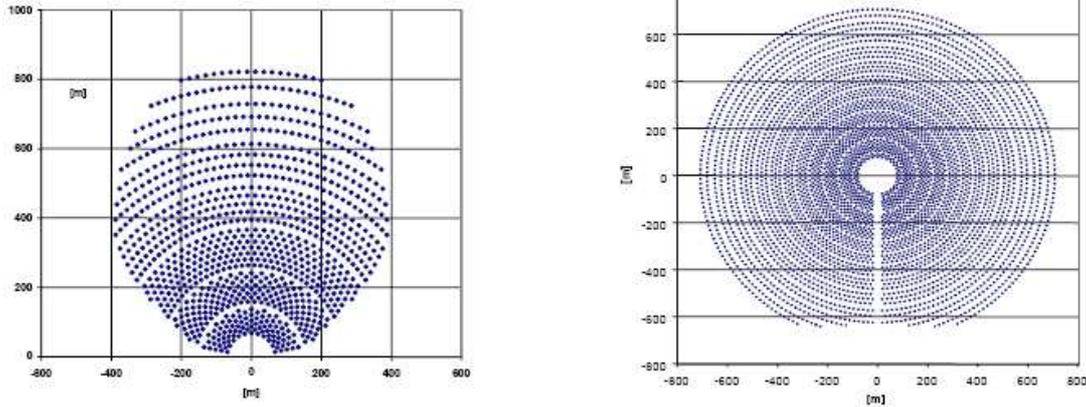


Figura 2.2. Despliegues típicos de un campo de heliostatos alrededor de la torre (situada en el origen de coordenadas): a la izquierda, campo Norte; a la derecha, campo circular

Los heliostatos de las primeras plantas de demostración se construyeron con espejos de vidrio sustentados en una estructura metálica (tecnología de vidrio-metal). A mediados de la década de 1980 se desarrollaron los primeros prototipos de heliostatos de membrana tensionada. Aunque estos últimos crearon grandes expectativas por su potencial de reducción de costes, los avances más significativos en este campo se han dado con heliostatos de vidrio-metal, debido principalmente al abaratamiento de los espejos y a la optimización de componentes.

El despliegue del campo de heliostatos en relación al receptor está condicionado en gran medida por las características del terreno disponible (forma de la parcela, orografía...), por el tamaño de la planta y por la posición del receptor [18]. Las dos opciones clásicas contemplan el despliegue del campo de heliostatos alrededor (campo circundante) o a un lado (campo Norte o Sur, según la latitud del emplazamiento) de una torre, sobre la cual se sitúa el receptor (ver figura 2.2).

Un desarrollo de gran interés potencial es el heliostato autónomo, desarrollado en la Plataforma Solar de Almería. Este heliostato se alimenta con la energía producida por un pequeño panel fotovoltaico instalado sobre su estructura y se controla vía radio, lo que elimina la necesidad de cableados de potencia y control del campo de heliostatos, con la consiguiente reducción de costes.

No obstante, se han propuesto otras disposiciones, que tratan de aprovechar la orografía del terreno (por ejemplo, una ladera orientada al Sur) o usan un concentrador secundario para evitar los inconvenientes derivados de situar el receptor sobre una torre.

II-B. Receptor Solar

El receptor de una CETS de receptor central es el dispositivo donde se produce la conversión de la radiación solar concentrada en energía térmica, la cuál en la mayoría de los casos se traduce en aumento de entalpía de un fluido.

Las dimensiones del receptor deben permitir además de un rendimiento termodinámico aceptable, un reparto de flujo de radiación incidente en su superficie lo suficientemente

homogéneo como para que no se produzcan picos de flujo superiores a los que el material del receptor puede soportar sin perjudicar a su vida útil, y posibilitar a su vez que el desbordamiento de radiación en los contornos del receptor, efecto que en inglés se denomina “spillage”, sea mínimo.

El receptor solar está formado fundamentalmente por: la superficie de absorción, compuesta de múltiples paneles modulares, la estructura del receptor, a la cuál están unidos los paneles de absorción, tuberías de interconexión entre paneles, colectores exteriores e interiores, pueden existir tanques de sobrepresión y calderines de vapor, y por último, el sistema de control.

A lo largo de la breve historia de la tecnología de SRC, se han propuesto y ensayado un gran número de receptores de diversas características geométricas y operativas con distintos fluidos de trabajo. Así se puede hablar de tres configuraciones típicas del receptor, que son las mostradas en la figura 2.3.

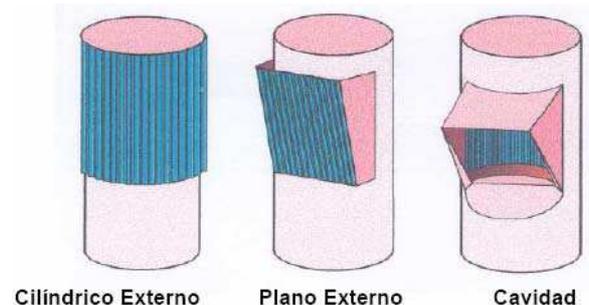


Figura 2.3. Configuraciones típicas del receptor solar

En los receptores exteriores (cilíndricos o planos) la radiación solar reflejada por el campo de heliostatos incide directamente sobre la superficie absorbidora, mientras que en los receptores de cavidad, la radiación pasa a través de una apertura a una zona hueca en forma de caja, antes de llegar a las superficies absorbentes.

Las principales ventajas e inconvenientes entre los receptores externos y los de cavidad son las siguientes [18]:

- Las pérdidas por radiación, en general, son mayores para los receptores externos que para los de cavidad. Esto es así ya que los paneles absorbentes de los receptores externos tienen mayores factores de forma hacia el entorno. De la misma forma, las pérdidas por reflexión también son mayores para un receptor externo.
- El volumen del receptor, así como el número de componentes y sus costes son mayores para los receptores de cavidad. Pero por otro lado al ser más voluminosos, los receptores de cavidad son más adiabáticos que los externos, reduciéndose de esta forma los transitorios al cambiar las condiciones de contorno (por ejemplo el paso momentáneo de nubes que atenúan la radiación solar)

Existe otra configuración del receptor, además de las tres anteriores, que ha sido usada en diferentes proyectos europeos, esta configuración es la de receptor volumétrico, usando como fluido de trabajo el aire. Los receptores volumétricos están formados por una estructura metálica o cerámica de diversas formas con una matriz volumétrica sobre la que incide la radiación reflejada, calentando de esta forma el aire que pasa por su interior (figura 2.4). Un ejemplo de este tipo de receptor es el que tiene la instalación del proyecto TSA situado en la PSA, con el receptor SOLAIR 3MW (figura 2.5).

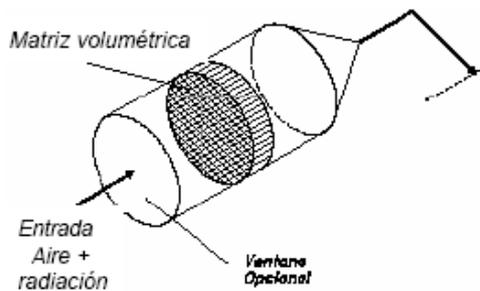


Figura 2.4. Receptor volumétrico

Su principal ventaja respecto a las configuraciones tradicionales es que al trabajar con aire se consiguen temperaturas de operación mucho mayores.

Los fluidos de trabajo usados hasta ahora como fluidos caloportadores en el receptor de un SRC han sido fundamentalmente los que se enumeran a continuación:

1) *Agua/vapor*: Es el medio de transporte de calor más usado en la industria. A la salida del receptor el vapor alcanza temperaturas en el rango de 490 °C - 525 °C. La gran ventaja del uso de este fluido de trabajo es que tras alcanzar las condiciones de diseño en el receptor, el vapor se expande directamente en la turbina sin necesidad del uso de intercambiadores intermedios para producir dicho vapor.

2) *Sales fundidas*: Normalmente son mezclas binarias de nitrato de sodio y potasio. Se trata de un fluido caloportador relativamente barato y no tóxico. Las sales fundidas son un medio adecuado como fluido de trabajo en el receptor y como fluido de almacenamiento térmico, ya que es un fluido estable hasta los 565 °C aproximadamente y permanecen en estado

líquido hasta unos 245 °C. Hay una precaución a tener en cuenta relacionada con el hecho de la alta temperatura de solidificación mencionada anteriormente, debiéndose tomar por tanto las oportunas medidas para evitar la solidificación del fluido en tuberías, intercambiadores y depósito de almacenamiento.

3) *Sodio líquido*: El uso del sodio líquido como fluido caloportador se ha desarrollado en la industria nuclear. El sodio tiene unas excelentes propiedades de transferencia de calor permitiendo el empleo de receptores de menor tamaño que los que usan otros fluidos de trabajo. La operación con sodio es similar a la de sales fundidas, siendo estable en estado líquido hasta unos 540 °C y con punto de fusión en unos 98 °C. El problema del sodio es su alta reactividad con el aire y el agua, por tanto deben extremarse las medidas de seguridad para evitar escapes de sodio a la atmósfera. Debido a su peligrosidad el sodio líquido está en desuso hoy en día.

4) *Aire*: Ha sido el último fluido de trabajo en incorporarse al uso en receptores solares. Como ya se comentó anteriormente, su uso está íntimamente ligado a los receptores volumétricos y su gran ventaja es la facilidad de operación y mantenimiento de los diferentes equipos, así como el alto valor de temperatura (hasta unos 1200 °C) que puede llegar a alcanzar el aire a la salida del receptor.

II-C. La Torre

Para asegurar un buen rendimiento geométrico del campo de helióstatos, el receptor solar se debe instalar a una cierta altura sobre dicho campo. Esto se consigue situando el receptor en una torre, que puede ser de hormigón o acero. Su altura es uno de los parámetros más importantes en el proceso de optimización del campo solar, dado que siempre existe un óptimo técnico a partir del cual un incremento en la altura de la torre perjudica los rendimientos generales del campo. Puede existir además un óptimo económico que delimite una altura de torre inferior a la determinada por el óptimo técnico, ya que es posible llegar a un punto a partir del cual, el coste añadido a una altura de torre superior no compensa el ahorro provocado por una mejora del rendimiento general del campo.



Figura 2.5. Sistema TSA-SOLAIR con el receptor en funcionamiento

II-D. Sistema de Control

La función principal del sistema de control de un SRC es gobernar los arranques y paradas diarios. El cambio de un modo de operación a otro implica numerosas etapas y consideraciones, por lo que el sistema de control es fundamental para automatizar el funcionamiento de la planta. Es por ello que el diseño del sistema de control tiene que estar totalmente integrado en el proceso del diseño total de una planta.

II-E. Sistema de Almacenamiento Térmico

Uno de las grandes inconvenientes de la energía solar es su discontinuidad en el tiempo, pero en el caso de los sistemas de concentración se le añade además una segunda restricción, ya que estos sistemas sólo aprovechan la radiación solar directa, por lo que necesitan que no haya nubes. Para solventar estos problemas se disponen de sistemas de almacenamiento térmico.

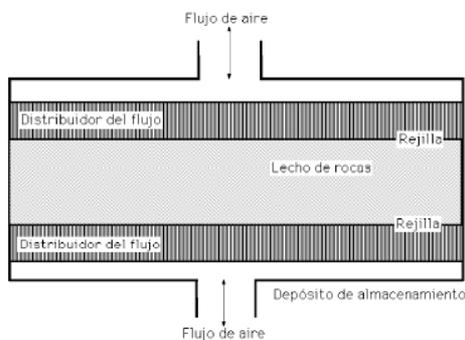


Figura 2.6. Sistema de almacenamiento térmico de lecho de rocas

Tradicionalmente se han propuesto tres tipos de sistemas de almacenamiento: sistemas basados en el calor sensible, en el calor latente y en la energía termoquímica [1].

1) *Los sistemas basados en el calor sensible* almacenan la energía térmica captada en el receptor en un medio con buenas propiedades para almacenar el calor sensible en un volumen dado. Los medios más utilizados son: aceites térmicos y sales fundidas. También se usa como medio de almacenamiento térmico el aire (cuando se usan receptores volumétricos), usándose junto con materiales con baja conductividad térmica como son rocas, arenas o ladrillos cerámicos. El sistema de almacenamiento térmico de lecho de rocas (figura 2.6) es muy usado cuando el receptor usado en la planta es un receptor volumétrico.

2) *Sistemas basados en el calor latente.* El calor latente asociado a los cambios de fase de una sustancia es otra manera potencial de almacenar calor. La temperatura, prácticamente constante, a la que se da el cambio de fase de la sustancia usada para el almacenamiento térmico, tendrá que ser compatible con los requerimientos de la planta, es decir tendrá que darse a una temperatura tal que permita la producción de vapor en las condiciones de diseño.

3) *El almacenamiento termoquímico* está basado en la acumulación del calor que se produce cuando se dan ciertas reacciones químicas reversibles. Una característica atractiva del almacenamiento termoquímico es la posibilidad de almacenar y transportar los constituyentes del sistema a temperatura ambiente, es decir, el calor de alto grado puede almacenarse a temperatura ambiente. Sin embargo, sólo unos pocos elementos tienen un coste lo suficientemente bajo como para ser considerados viables.

El sistema basado en el calor sensible suele ser el sistema de almacenamiento más empleado, pudiendo implementarse de dos formas: almacenamiento directo, en el cuál el fluido de trabajo del receptor es el mismo que el medio de almacenamiento, o almacenamiento indirecto, en el que se usan diferentes fluidos de trabajo para el receptor y para el almacenamiento.

II-F. Sistema de Producción de Potencia

El sistema de generación de energía eléctrica de una planta solar de receptor central consta fundamentalmente de los mismos elementos de los que consta el mismo sistema en una planta convencional que trabaja con el ciclo Rankine [1], es decir: grupo de turbina de vapor, condensador, bombas de recirculación del vapor condensado y la caldera de producción de vapor, elemento, éste último, que en una planta solar se sustituye total o parcialmente por el receptor solar.

Las condiciones transitorias de operación que se producen en un SRC, debido a la variación de la intensidad de la radiación solar, hacen que la turbina además de trabajar con rendimientos bajos, sufra un gran desgaste, por lo que es importante realizar los correctos mantenimientos de la misma.

II-G. Sistema Auxiliar

Como sistema auxiliar de una planta solar de receptor central se agrupan diversos elementos que son necesarios para su funcionamiento, pero que no difieren en nada de los mismos sistemas en una planta de potencia convencional. Estos componentes proporcionan una ayuda a los principales componentes de la planta para que realicen sus funciones de una manera eficiente, fiable y segura. Algunos de estos componentes auxiliares son [16]: a) Sistema de aire comprimido; b) Sistema de protección contra incendios; c) Equipos de refrigeración; d) Suministro y almacenamiento de agua; e) Suministro auxiliar de potencia.

II-H. Sistema SCADA

SCADA viene de las siglas inglesas "Supervisory Control And Data Acquisition", es decir, sistema de adquisición de datos y control supervisor. Son programas software especialmente diseñados para funcionar sobre ordenadores en el control de diferentes sistemas ya sean lineales o no-lineales, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (tarjetas de adquisición de datos -DAQ-, autómatas programables, etc.) y permitiendo el control del proceso de forma automática desde la pantalla del computador [14]. Además, provee de toda la información que se genera en el proceso a uno o más usuarios, tanto del mismo nivel como de

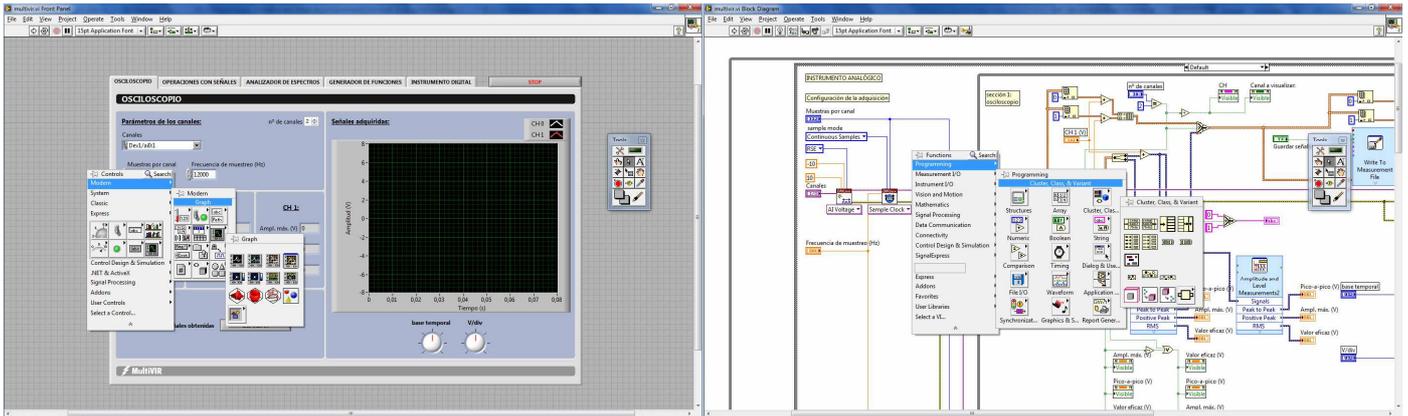


Figura 2.7. Panel frontal (izq.) y diagrama de bloques (drch.) de una aplicación LabVIEW

nivel superior, como son los supervisores dentro de la empresa [29]: control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc.

En este tipo de sistemas normalmente existe uno o más computadores, que efectúan tareas de supervisión y gestión de alarmas, así como tratamiento y adquisición de datos y control de procesos [29]. La comunicación entre éstos se realiza mediante buses especiales o redes LAN. Todo esto se ejecuta normalmente en tiempo real, y están diseñados para dar al operador de planta la posibilidad de supervisar y controlar dichos procesos.

II-1. Desarrollo de un SCADA con LabVIEW

LabVIEW de National Instruments (NI) es un revolucionario entorno de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar aplicaciones de tipo SCADA que realicen adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de medida, presentaciones de datos, automatizar y realizar cálculos complejos de señales analógicas y digitales capturadas a través de tarjetas de adquisición de datos, puertos serie y GPIBs (Buses de Intercambio de Propósito General). LabVIEW da la flexibilidad de un potente ambiente de programación, pero mucho más sencillo que los entornos tradicionales.

LabVIEW se diferencia de otras aplicaciones en que los sistemas usan lenguajes basados en líneas de texto (como C o BASIC), mientras que LabVIEW utiliza un lenguaje de programación gráfico, G, para crear el programa mediante diagramas de bloques, facilitando de esta manera el entendimiento y manejo de dicho lenguaje para el diseñador y programador de aplicaciones tipo SCADA. En la figura 2.7 se puede observar el panel frontal y el diagrama de bloques de una aplicación desarrollada en LabVIEW.

A diferencia de los lenguajes de propósito general, LabVIEW tiene funciones específicas para acelerar el desarrollo de aplicaciones de medida, control y automatización, incluye librerías para la adquisición, análisis, presentación y almacenamiento de datos, GPIB y puertos serie. Además de otras prestaciones, como la conectividad con otros programas, por ejemplo de cálculo, y en especial Matlab. Proporciona herramientas muy potentes para crear aplicaciones sin líneas de texto de código, con LabVIEW se pueden colocar objetos ya

construidos para crear interfaces de usuario rápidamente. Después se especifican las funciones del sistema construyendo diagramas de bloques [12].

Con LabVIEW se puede conectar de manera transparente todo tipo de hardware incluyendo instrumentos de escritorio, tarjetas insertables, controladores de movimiento y controladores lógicos programables (PLCs). Aparte de la parte física LabVIEW también es compatible con otras aplicaciones y puede compartir datos a través de ActiveX, la Web, DLLs, librerías compartidas, SQL, TCP/IP, XML, OPC y otros.

En muchas aplicaciones, la velocidad de ejecución es vital. Con un compilador incluido que genera código optimizado, con LabVIEW las aplicaciones que se generan tienen velocidades de ejecución comparables con programas C. Con LabVIEW se puede desarrollar sistemas a través múltiples plataformas incluyendo Windows, Macintosh, UNIX o sistemas de tiempo real.

Está basado en la programación modular, lo que permite crear tareas muy complicadas a partir de módulos o submódulos mucho más sencillos. Además estos módulos pueden ser usados en otras tareas, con lo cual permite una programación más rápida y provechosa. Por supuesto también ofrece la ventaja de hacer depurado en cualquier punto de la aplicación, se pueden establecer puntos de ruptura, hacer una ejecución paso a paso, ejecutar el programa hasta un punto determinado y se observar como los datos van tomando valores a medida que se va ejecutando la aplicación. Además también lleva incorporado generadores de señales para poder hacer un simulador [11].



Figura 3.1. Planta CESA-1

III. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTUALES INSTALACIONES

La PSA cuenta con dos instalaciones excepcionales para el ensayo y validación de componentes y aplicaciones con tecnología de receptor central. Las instalaciones CRS y CESA-1 permiten abordar proyectos y validar tecnologías en el rango de los cientos de kilovatios a varios megavatios. Son por tanto dos laboratorios a intemperie especialmente acondicionados para escalar y cualificar sistemas en su fase previa a la etapa de demostración comercial.

III-A. La instalación CESA-I de 7 MWt

El proyecto CESA-I fue promovido por el Ministerio de Industria y Energía de España e inaugurado en mayo de 1983 para demostrar la viabilidad de las plantas solares de receptor central y para permitir el desarrollo de la tecnología necesaria. En la actualidad CESA-I (figura 3.1) ya no produce electricidad, sino que se opera, con un alto grado de flexibilidad, como una instalación de ensayo de componentes y subsistemas como heliostatos, receptores solares, sistemas de almacenamiento térmico, turbinas de gas solarizadas, sistemas de control e instrumentación para la medida de altos flujos de radiación solar concentrada.

También es utilizada para otras aplicaciones que requieran altas concentraciones fotónicas sobre superficies relativamente grandes, como es el caso de procesos químicos a alta temperatura, tratamiento superficial de materiales o experimentos astrofísicos.

La planta CESA-I y el sistema TSA instalado en la PSA se utiliza para generar energía eléctrica a partir de energía solar. Está compuesta por un campo de heliostatos (grandes espejos que reflejan la radiación solar sobre un punto de una torre y que disponen de un sistema de seguimiento automático del sol), un receptor volumétrico donde inciden los rayos reflejados por los heliostatos, un intercambiado de calor aire/agua que actúa como generador de vapor, un sistema de almacenamiento de energía, dos soplantes (*blower* en inglés) y sus correspondientes tubos de aire, dos reguladores (*dampers* en inglés) y una bomba de alimentación de agua. La instalación

está situada en lo alto de la torre CESA-I a 80 metros sobre el nivel del suelo.

III-B. Campo de heliostatos CESA-I

La instalación capta la radiación solar directa por medio de un campo de 300 heliostatos, de $39,6 \text{ m}^2$ de superficie cada uno, distribuidos en 16 filas a lo largo del campo con una extensión de 330 por 250 m (ver figura 3.2). Los heliostatos tienen una reflectividad nominal promedio del 90%, el error de seguimiento solar en cada eje es de 1,2 mrad y la calidad de imagen en rayo reflejado de 3 mrad. La instalación CESA-I cuenta con la experiencia más extensa en heliostatos tipo vidrio-metal que hay en el mundo, disponiendo en su campo de unidades de primera generación fabricadas por SENER y CASA, así como unidades con facetas reflectantes de segunda generación de la empresa ASINEL y facetas y prototipos de tercera generación desarrollados por CIEMAT en colaboración con la empresa SOLUCAR. A pesar de sus más de 27 años de antigüedad, el campo de heliostatos se encuentra en un estado

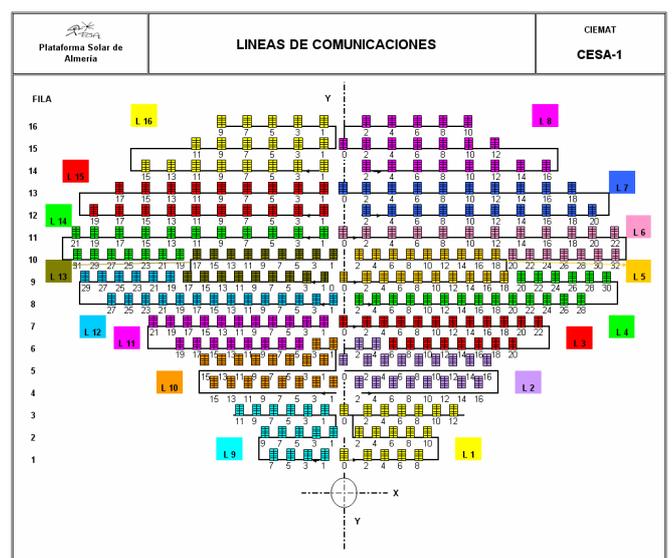


Figura 3.2. Campo de heliostatos CESA-1

óptimo de funcionamiento al haberse mantenido con carácter estratégico un programa continuado de reposición de espejos y facetas y de reparación de componentes en los mecanismos de accionamiento.

Al Norte del campo de heliostatos se ubican dos áreas adicionales que son utilizadas como plataforma de pruebas de nuevos prototipos de heliostatos, una situada a 380 m de la torre y la otra a 500 m de distancia.

La máxima potencia térmica que proporciona el campo sobre la apertura del receptor es de 7,5 MW, a una irradiancia típica de diseño de 950 W/m^2 se obtiene un flujo pico de $3,3 \text{ MW/m}^2$. El 99% de la potencia se recoge en un círculo con diámetro de 4 m y el 90% de la misma en un círculo de 2,8 m.

Para el proyecto TSA-SOLAIR la disposición específica del campo abarca hasta 180 heliostatos enfocados en 5 diferentes puntos de enfoque y 4 puntos de seguimiento desfasado desde donde los heliostatos son movidos dentro del foco.

El sistema de control del campo de heliostatos (HFCS) de la torre CESA-I permite la definición de hasta 32 puntos de apunte en los cuales los heliostatos son enfocados por defecto o específicamente asignados. Esto permite que los puntos de enfoque sean modificados incluso si hubiera heliostatos enfocados en ellos, esto facilita la modificación en tiempo real del perfil de flujo en el receptor durante la operación. Además los pasos de nubes pueden ser simulados desenfocando y reenfocando un preseleccionado grupo de heliostatos desde diferentes puntos de enfoque durante una cierta secuencia de tiempo.

III-C. Receptor Solar y Sistema de Potencia

La torre es de hormigón y tiene una altura de 80 m, siendo capaz de soportar una carga de 100 toneladas. A lo largo de la torre hay tres niveles de ensayo:

- Una cavidad adaptada para su uso como horno solar y ensayo de materiales, situada a 45 m de altura, que ha sido utilizada con gran éxito en la reproducción de la rampa de calentamiento, durante su reentrada en la atmósfera, de las piezas del escudo cerámico de los transbordadores espaciales y también en el tratamiento superficial de aceros y otros compuestos metálicos.
- Una cavidad con un banco calorimétrico de ensayo de receptores volumétricos presurizados a 60 m.
- Una instalación de ensayo multipropósito para nuevos conceptos de receptor, en la cota de 75 m.
- La instalación de ensayo de receptores volumétricos atmosféricos en la parte superior de la torre, a la cota de 80 m. La torre se completa con una grúa en la parte superior con 5 toneladas de capacidad y un elevador montacargas con capacidad para 1.000 kg.

El nuevo receptor instalado en el año 2003 en el sistema TSA es del tipo volumétrico, está situado en lo alto de la torre a 80 m sobre el nivel del suelo, su potencia nominal es de 3 MW térmicos y su temperatura nominal en operación es de $700 \text{ }^\circ\text{C}$.

A través del receptor circula aire mientras los heliostatos apuntan en él, de esta manera el receptor es refrigerado con el aire al mismo tiempo que hay un intercambio de calor entre el receptor y el aire calentándose este último, este aire caliente será enviado a un intercambiador de calor para producir vapor que más tarde se mandará a una turbina para generar electricidad.

El nuevo receptor consta de 270 copas de material cerámico en las cuales hay situados hasta 65 termopares con la siguiente distribución:

- 37 termopares en el absorbedor.
- 9 termopares dentro del absorbedor.
- 8 termopares detrás del absorbedor.
- 3 termopares en la protección.
- 5 termopares en la salida del aire caliente.
- 3 termopares en la entrada del aire templado de retorno.

Las temperaturas medidas en el receptor son enviadas por el sistema de control del sistema TSA al sistema de control del campo de heliostatos (HFCS) cada segundo, si alguna de estas temperaturas superara un máximo prefijado el HFCS automáticamente desenfocaría los heliostatos para evitar daños o deformaciones en el receptor producidos por altas temperaturas.

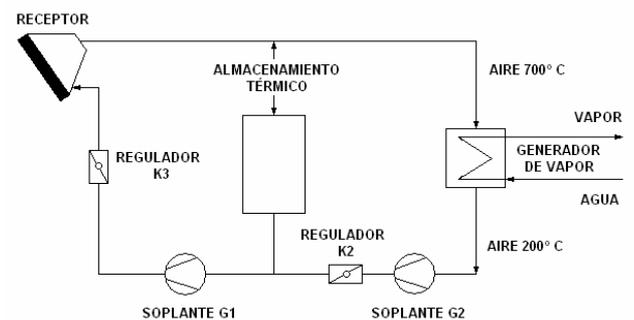


Figura 3.3. Esquema funcional del sistema TSA-SOLAIR, con sus puntos más relevantes

La radiación solar es reflejada por el campo de heliostatos y concentrada en las copas del absorbedor del receptor con una densidad de flujo media de $0,3 \text{ MW/m}^2$ y una densidad máxima del $0,8 \text{ MW/m}^2$, la potencia máxima del receptor es aproximadamente de 3 MW con una eficiencia del absorbedor del 85%. Para alcanzar la distribución de flujo requerida, se utiliza una estrategia de apunte sobre cinco puntos del receptor. Por lo tanto, las copas de material cerámico del absorbedor se calienta y su calor es transferido al aire que fluye detrás, según el principio volumétrico. El aire abandona el receptor a $700 \text{ }^\circ\text{C}$. La soplante G1 (figura 3.3) controla el flujo másico de aire a través del receptor y la soplante G2 el flujo másico de aire a través del generador de vapor (del tipo 'once-through'). El generador de vapor está conectado al existente ciclo agua/vapor del complejo CESA-I. Este generador de vapor opera normalmente a 1800 kW, produciendo vapor a una temperatura de $340 \text{ }^\circ\text{C}$ y a 45 bares de presión. Este generador de vapor está conectado a un ciclo Rankine, por lo que el vapor producido se mandará a una turbina de vapor.

Variando la velocidad de la soplante G1 se consigue regular la temperatura media y la de salida del absorbedor. Dependiendo de la carga del generador de vapor, se puede utilizar (para carga o descarga) el aire almacenado en un tanque termocline (constituido por elementos con forma de silla de caballo de Al_2O_3). El cociente de la velocidad de la soplante de G1 a G2 determina el aire que atraviesa el almacenaje. Los reguladores K3 y K2 son usados para operar la planta en diferentes modos, por ejemplo, receptor y almacenaje solamente o almacenaje y generador del vapor solamente. El regulador K2 es del tipo abierto –cerrado (todo o nada), mientras que el regulador K3 puede alcanzar posiciones intermedias. Además, K3 se utiliza para reducir más el flujo total del receptor tan pronto como la velocidad de la soplante G1 alcance un límite mínimo del 15 % (zona muerta de este actuador) [16]. El aire extraído del generador o del almacenaje térmico se recircula y se reinyecta delante del absorbedor para hacer el uso máximo de la energía contenida restante y reducir al mínimo las pérdidas del sistema.

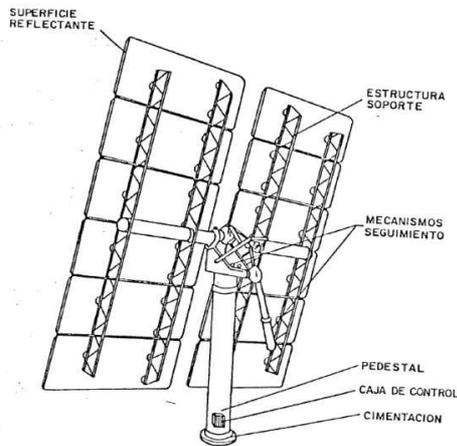


Figura 3.4. Vista de un heliostato tipo SENER

III-D. Descripción de los heliostatos

Las aplicaciones en alta temperatura requieren una gran concentración solar lo que se consigue mediante el empleo de grandes reflectores denominados heliostatos que reflejan y concentran la radiación solar en lo alto de una torre en donde es situado el receptor o absorbedor solar. Por este motivo estas plantas de producción se denominan Centrales de Torre Central.

Un heliostato es un gran espejo soportado por una estructura móvil que realiza un seguimiento del Sol de forma que el rayo reflejado por el espejo es dirigido hacia un receptor situado en lo alto de una torre.

La figura 3.4 muestra a un heliostato tipo SENER con 40 m^2 de espejo compuesto por los siguientes elementos [4]:

- Facetas. Forman la parte reflectante del heliostato pudiendo ser de diferentes formas y tamaños. Están básicamente compuestas por un marco metálico sobre el que se fija cada espejo.

- Estructura y mecanismos. La estructura de un heliostato está formada por unas celosías metálicas que sirven de soporte a las facetas las cuales se sujetan mediante elementos roscados. Estas celosías están unidas a un eje cilíndrico horizontal que rigidiza toda la superficie reflectante. Este eje apoya sobre un pedestal vertical, cilíndrico y metálico mediante un cabezal o mecanismo reductor que permite la realización de movimientos lentos y precisos, en sus dos ejes, pudiendo vencer grandes esfuerzos sobretodo ante cargas de viento intenso. El movimiento del heliostato es realizado por dos motores eléctricos.
- Elementos de control. Se compone de una caja de control local, situada en el interior del pedestal del heliostato cableada a elementos externos a ella tales como cuatro finales de carrera, dos codificadores ópticos (para la lectura angular de la posición de los dos ejes del heliostato) y dos motores eléctricos. Todo este cableado forma lo que se denomina maceado del heliostato.

Estos heliostatos se alimentan de la red de fluido eléctrico convencional de la planta solar y se comunican con un control Central mediante líneas de comunicaciones serie cableadas y canalizadas por todo el campo Solar.

III-E. Control local

Para poder controlar adecuadamente el foco del heliostato este ha de ser guiado constantemente en dos ejes por lo que es necesario determinar con gran precisión la posición aparente del sol sobre la bóveda celeste.

Para ello un dispositivo electrónico instalado a pie de heliostato denominado “Control Local” ha de abordar las labores de cálculo y guiado de los ejes del heliostato.

Diferentes algoritmos astronómicos han sido empleados en los últimos 27 años para la determinación de la posición solar. Desde el algoritmo de Spencer, empleado en los primeros campos de heliostatos de los años 80, hasta el actual algoritmo de Michalsky y otros derivados del mismo, se ha avanzado enormemente ya que errores iniciales, de más de 3 minutos en el cálculo de las coordenadas solares, han sido reducidos a menos de 0,5 minutos.

Debido a la complejidad en el cálculo del vector solar, en los primeros campos de heliostatos aparecidos en los años 80, el cómputo se realizaba en un ordenador central dispuesto en la sala de control de la Planta solar. Este ordenador, denominado “Control Central” calculaba las consignas de posición de cada uno de los heliostatos del campo las cuales eran transferidas a los heliostatos por una línea de comunicaciones. Los controles locales de los heliostatos en esta época eran meros posicionadores y dependían del Control Central para funcionar.

La evolución de los microcontroladores y su penetración en el campo industrial durante la década de los años 90 posibilitaron realizar estas tareas en el control local apareciendo una nueva generación de heliostatos que se hicieron llamar “Inteligentes” ya que eran capaces de realizar las tareas de apunte sin la asistencia continua del Control Central.

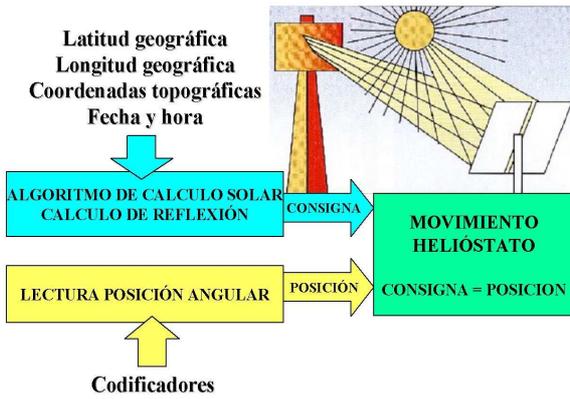


Figura 3.5. Control Local inteligente

Estos heliostatos, como indica la figura 3.5, debían de calcular en cada instante la posición solar, partiendo de la posición geográfica y de la fecha y hora correctas, y debían de realizar el cálculo de la reflexión del rayo en el espejo.

Para ello son necesarios los siguientes datos:

- Coordenadas topográficas del heliostato. Nos indican la posición xyz del heliostato en el campo solar tomando de origen de coordenadas el centro de la torre.
- Posiciones angulares de los ejes del heliostato.
- Posición deseada del foco del heliostato.

Los ejes de movimiento del heliostato están definidos en la figura 3.6. El eje de azimut, con cero al sur, debe de permitir un movimiento de este a oeste mayor de 180 grados. El eje de elevación, con cero en la vertical, y dependiendo del tipo de heliostato, deberá de permitir un movimiento de al menos 90 grados.

Para el posicionado del heliostato es necesaria la medición precisa de la posición angular de los dos ejes lo que se consigue, empleando codificadores ópticos con resoluciones del orden de 10.000 pasos por vuelta. Esto significa que, por exigencias del apunte en campos de heliostatos de gran tamaño,



Figura 3.7. Caja de control local

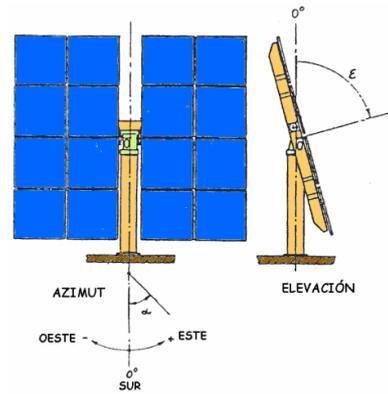


Figura 3.6. Movimientos heliostato

hemos de poder medir desplazamientos angulares menores de un mili radián.

Hoy en día, mediante nuevas técnicas de control distribuido, cada heliostato realiza sus tareas con total independencia gracias al empleo de microcontroladores con gran capacidad de cálculo. Como muestra la figura 3.7, las tarjetas electrónicas de control, servos y fuentes de alimentación quedan localizados en el interior de un armario, galvanizado o pintado, estanco y con protección IP65 situado usualmente a pie de heliostato denominado "Control Local" (CL).

En los controles locales más evolucionados un microcontrolador, asistido por un reloj en tiempo real, calcula la posición del sol en intervalos regulares de tiempo que van desde dos a diez segundos. La frecuencia del cálculo dependerá de las prestaciones exigidas al heliostato y de su proximidad o lejanía de éste a la torre.

Como muestra la figura 3.8, este microcontrolador deberá de gestionar las entradas y salidas digitales necesarias para poder controlar el funcionamiento seguro del heliostato además de informar y/o de ejecutar las tareas recibidas desde el Control Central vía una línea de comunicaciones y de permitir el mando local para tareas de reparación y mantenimiento.

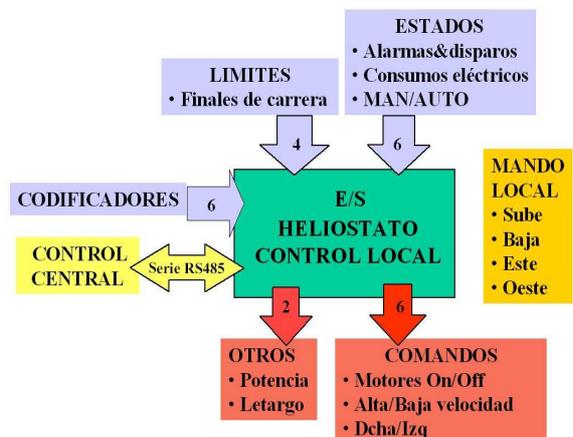


Figura 3.8. Señalización del control local

Para conseguir una aproximación lenta a las coordenadas de foco calculadas por el microcontrolador del control local del heliostato, es necesario, en la mayoría de los casos, el empleo de varias velocidades de motor. Una velocidad lenta será empleada para el seguimiento preciso del sol y otra más rápida, será utilizada para la realización de movimientos de subida y bajada al principio y final del día.

Es por ello que, en el interior de armario del control local, además de la tarjeta de control se alojarán los servos apropiados al tipo de motor escogido así como las fuentes de alimentación y todo aquello que sea necesario. La disposición de este elemento en el heliostato dependerá de los siguientes condicionantes:

- Localización fácilmente accesible que facilite la reparación *in situ* y el mando local en campo.
- Debe de permitir los movimientos del heliostato sin probabilidad de bloqueo o choque con otros elementos del heliostato, incluso con su puerta abierta.
- Permitir la aireación y el drenaje del agua para lo cual debe de estar instalado a una cierta altura sobre el nivel del suelo.
- Debe estar instalado en un lugar en sombra con el objeto de protegerlo de la radiación solar directa la cual podría provocar sobrecalentamientos sobretudo en meses de verano.

En un heliostato de dos pétalos (ver figura 3.9) la caja de control local del heliostato podrá ser situada en el interior del pedestal, en la parte posterior del pedestal por su lado norte no sobresaliendo del mismo o en el cabezal del heliostato.

En heliostatos de un solo pétalo con superficie reflectiva continua, la caja de control local del heliostato será instalada en la parte posterior del pedestal por su lado norte.

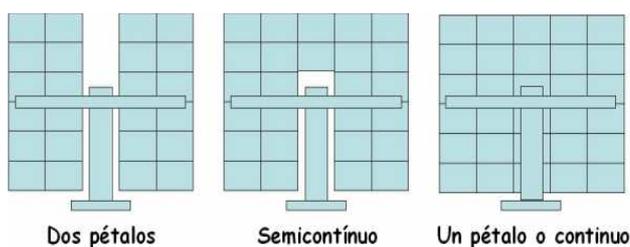


Figura 3.9. Tipos de heliostato

IV. DESCRIPCIÓN DE LOS ACTUALES SISTEMAS DE CONTROL

Como es bien conocido, los sistemas de receptor central de una planta solar pueden descomponerse básicamente en dos subsistemas. Por un lado el campo de heliostatos y por otro el receptor solar junto a un sistema de potencia [6]. La función principal del campo de heliostatos es la de reflejar y concentrar la radiación solar incidente sobre el campo en unos puntos determinados dentro del receptor solar [1], siendo el Sistema de Control del Campo de Heliostatos (HFCS) el encargado de este cometido. Por otro lado, se necesita un Sistema de Control para el Receptor y Sistema de Potencia (CRCS) cuyo cometido es el de regular la presión y temperatura del vapor generado por el receptor solar para la producción de energía [2,3].

En el campo CESA-I, todos los heliostatos dependen de un control central con el que deben comunicarse regularmente mediante 16 líneas de comunicaciones que recorren el campo, a través de las cuales se especifican las consignas que deben alcanzar. En el campo SSPS-CRS, a diferencia del campo CESA-I, se utilizan comunicaciones inalámbricas y los heliostatos siguen de forma automática al Sol por medio de algoritmos implementados en un microcontrolador que constituye el control local de los mismos [4], lo que permite independizarlos un poco del control central, el cual tendrá una función más orientada a la supervisión [29]. En ambos casos un sistema de control central se encarga de establecer una estrategia de apunte de grupos de heliostatos sobre determinados puntos del receptor solar para conseguir unas distribuciones de temperatura y flujo determinadas [7, 8]. Por otra parte, en ambas instalaciones otro sistema de control central es el encargado de la etapa de automatización de la operación con la planta de receptor central [6]. A través del receptor volumétrico, circula aire impulsado por una soplante que se calienta y posteriormente transfiere su energía para producir vapor en un intercambiador de calor.

IV-A. Sistema de Control del Campo de Heliostatos (HFCS)

En la actualidad el HFCS utilizado es un sistema de control comercial basado en tiempo real [8], desarrollado por una spin-off del CIEMAT [19,20], No obstante de aquí a corto plazo dejará de ser operativo cuando finalice la instalación de los nuevos sistemas de control locales integrados en los heliostatos del campo CESA-I basados en Modbus. Por este motivo se hace necesaria la implementación de un nuevo HFCS que gobierne los nuevos controles locales.

Como se comentó en la sección III de este trabajo, cada heliostato del campo dispone de un control local cuyo principal cometido es controlar los motores de estos ejes para posicionar al heliostato en las consignas deseadas. De forma general, las operaciones básicas que realiza un heliostato son posicionarse en una orientación fija o realizar el seguimiento de una coordenada.

El seguimiento continuo a una coordenada consiste en conseguir que el rayo reflejado por el heliostato quede incidiendo constantemente sobre un punto del espacio. Esto permitirá la concentración de la radiación solar incidente sobre los heliostatos del campo en un punto deseado del espacio. La realización del seguimiento supone el cálculo de los valores de consigna de elevación y azimut para el heliostato. Los valores

calculados dependerán de a) la coordenada donde se quiere incidir, b) de la posición del helióstato en el campo (respecto a la torre) y c) de la fecha y hora con la que se puede obtener la posición del sol en el cielo. Aunque las coordenadas donde se quiera hacer incidir el rayo reflejado no cambien es necesario recalcular periódicamente las consignas de elevación y azimut puesto que el sol cambia su posición en el cielo constantemente.

En el caso particular del campo CESA-I, todos los helióstatos dependen de un control central con el que deben comunicarse regularmente mediante 16 líneas de comunicaciones que recorren el campo, a través de las cuales se especifican las consignas de elevación y azimut que deben alcanzar.

IV-A1. Objetivos del actual HFCS

La actual aplicación para el control de campos de helióstatos del campo CESA-I fue desarrollada para cubrir los siguientes objetivos principales [7]:

- La aplicación debe ser lo mas genérica posible en el ámbito del control de campos de helióstatos, de forma que su implantación en otros campos de helióstatos o la modificación de las instalaciones de los campos en los que se encuentra funcionando (por ejemplo, por añadir nuevos helióstatos) no supongan un gran esfuerzo. Inicialmente debe poder controlar los dos campos disponibles en PSA.
- La aplicación debe ser modular y se dividirá principalmente en dos partes: la interfaz para el operador y el subsistema de control del campo. La interfaz para el operador se encargará de suministrar todos los comandos y acciones indicadas por el operador al subsistema de control y, además, proporcionaría información acerca del estado del campo. Por otra parte, el subsistema de control del campo debe proporcionar una Interfaz Lógica en Tiempo Real hacia el resto de los computadores de control.
- El módulo del control del campo proporcionará servicios principalmente hacia la interfaz del operador pero también hacia cualquier otro computador que requiera manejar el campo, como puede ser el sistema de control del receptor y del sistema de potencia. Este sistema podría, por ejemplo, indicar una alarma al detectar una temperatura elevada en alguna zona del receptor de manera que haga que se desenfocuen los helióstatos implicados.
- El objetivo de la modularidad de la aplicación pretende que esta pueda ser distribuida en varios computadores. Esta distribución ayudaría a hacer la aplicación más escalable en el caso de que se usase para controlar campos de helióstatos muy grandes. Además de permitir el reparto de la carga computacional entre varios computadores, en algunos casos, ayudaría a aumentar la tolerancia a fallos del sistema.
- Se busca que la aplicación sea independiente de la tecnología de comunicaciones utilizada con los

helióstatos. En las instalaciones de PSA la comunicación en los campos de helióstatos se realiza tanto a través de cable como a nivel inalámbrico. Así pues, se está creando un modulo independiente para las comunicaciones con una interfaz común que permita independizar la aplicación de la tecnología de comunicaciones utilizada por el campo de helióstatos.

- Con la intención de poder reutilizar en la medida de lo posible los módulos software creado, se hizo uso de las librerías ACE [30,31]. Estas librerías ayudan a conseguir independencia del API proporcionado por el Sistema Operativo por lo que módulos completos pueden ser reutilizados al ser recompilados en distintas plataformas. Añaden, además, una posibilidad de basar la aplicación en un conjunto de componentes distribuidos con soporte para tiempo real estricto.

IV-A2. Aspectos de implementación

Los requisitos temporales que se definieron para el sistema son los siguientes [7]:

- El subsistema de control (control central) debe comunicarse con cada helióstato al menos una vez cada 4 segundos. Por tanto, debe ser capaz, en el peor de los casos, de realizar los cálculos de consignas para todos los helióstatos, comunicarlos a los controles locales que correspondan y esperar la respuesta. Puesto que el número de helióstatos del campo y la capacidad de computación de la que dispone el control central pueden variar de un campo a otro, es posible que sea necesaria la distribución de la aplicación para que estos tiempos se cumplan.
- Se deben adquirir una serie de temperaturas y señales cada segundo. Los valores de estas temperaturas, cuando rebasan ciertos límites, y de las señales pueden generar una alarma y desenfocar todos o parte de los helióstatos cuyo rayo reflejado apunte al receptor.
- Todos los comandos ejecutados por los helióstatos tendrán un tiempo máximo para su finalización.

En el diseño, para tener en cuenta estas restricciones temporales, se ha optado por la metodología RT-UML. Se ha preferido ésta a otra metodología que contempla restricciones temporales como es HRT-HOOD porque esta segunda está más orientada al lenguaje de programación Ada. Para la programación de la aplicación se está usando el lenguaje C++, y se está siguiendo el estándar ISO POSIX C 1003.1c. La aplicación se ejecutara sobre el sistema operativo de tiempo real LynxOS.

Como ya se ha comentado, en la implementación se está haciendo uso de ACE y de una implementación de RT-CORBA basada en componentes ACE llamada TAO (The ACE ORB) [32].

En lo que respecta a la interfaz gráfica para el operador, se están usando el entorno grafico X-Window y el estándar Motif. Este modulo hace uso de una base de datos donde se encuentra toda la configuración de la aplicación. Se ha optado para esto por el uso de una pequeña librería que es enlazada a la

aplicación y que no precisa de ningún proceso externo. Este motor de base de datos (sqlite, <http://www.sqlite.org/>) soporta la mayor parte del SQL92 y es perfectamente valido para la aplicación que se está desarrollando.

El uso de objetos RT-CORBA permitiría la distribución de la aplicación a la vez que ofrece un interfaz lógico a otras aplicaciones como el Sistema de Control del Receptor y Sistema de Potencia que permitirá la gestión del campo de heliostatos. En la figura 4.1 se muestra la relación del SCCH con otros sistemas. La elección de la distribución de CORBA TAO se debe a su amplio uso tanto industrial como científico y a que, puesto que está basada en componentes ACE, puede usarse en gran numero de plataformas, entre las que se encuentran Microsoft Windows, Linux y LynxOS, que son las usadas principalmente en PSA.

Una vez creada la infraestructura de objetos que forman la aplicación es posible considerar varias configuraciones según la potencia de cálculo disponible, el número de líneas de comunicaciones del campo, el número de heliostatos, etc. Se va a distinguir principalmente tres tipos de módulos en la aplicación [34]: a) los objetos que gestionan los heliostatos; b) los módulos de comunicaciones; c) la interfaz del operador.

Estos módulos pueden estar separados o puede ejecutarse en diferentes computadores. Es mas, es posible disponer de varios procesos interfaz (en el mismo o en distintos computadores) que usen los servicios de un mismo subsistema de control. La figura 4.2 muestra un esquema de estos tres módulos. En ella aparecen 16 líneas que comunican el subsistema de comunicaciones con el campo de heliostatos. También aparecen 300 conexiones entre el subsistema de control y el subsistema de comunicaciones. Estas 16 líneas se corresponden a las líneas de comunicaciones usadas en el campo CESA-I y las 300 conexiones a los 300 heliostatos del campo.

IV-A3. Objetos heliostatos

El heliostato será el componente principal del campo y debería ser controlado individualmente. Para ello se creara un objeto lógico activo con respuesta determinista almacenando la información relativa al heliostato físico. Este objeto activo tendría dos tareas independientes. Una tarea estaría encargada de gestionar el estado del heliostato, el cual puede variar bien por llamadas de otros módulos de la aplicación a métodos de la interfaz del objeto heliostato o bien por respuestas concretas del control local del heliostato físico. La función de la otra tarea será la de efectuar las comunicaciones necesarias con el control local del heliostato físico dependiendo del estado actual. Se ha optado por separar la manipulación del estado actual del objeto heliostato y las comunicaciones de este debido a que las comunicaciones pueden incurrir en bloqueos debidos a otros heliostatos pertenecientes a la misma línea de comunicaciones.

La tarea que mantiene el estado actual del heliostato manipulará una máquina de estados finitos que ha sido diseñada para todos los heliostatos. Esta máquina, además de indicar el estado actual, establecerá las transiciones permitidas entre estados. Las transiciones serán activadas ante la llegada de eventos que pueden generarse al realizar llamadas a la interfaz del objeto heliostato (como puede ser el indicar al

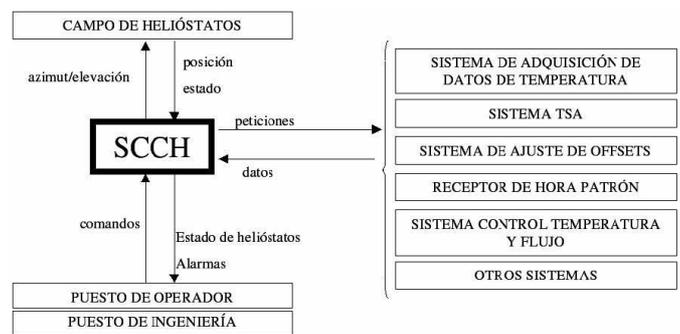


Figura 4.1. Diagrama de contexto

heliostato que dirija el rayo reflejado hacia el receptor) o por respuestas específicas del control local del heliostato físico (como puede ser la indicación de un fallo en algún motor). En la figura 4.3 se muestra el diagrama de la máquina de estados finitos usada por los heliostatos.

Además de las dos tareas que ejecuta un objeto heliostato comentado anteriormente es posible que, dependiendo del estado actual en el que se encuentre, este objeto disponga de otra tarea adicional asociada al estado actual. Cuando el heliostato se encuentra en un estado en el que se debe realizar el seguimiento de un punto (esto es, dirigir el rayo reflejado de forma que incida en una coordenada concreta) es necesario realizar una actividad consistente en recalcular periódicamente las consignas de los ejes de elevación y azimut. Estos cálculos serán realizados por esta nueva tarea que será activada al entrar a un estado en el que se precise hacer seguimiento.

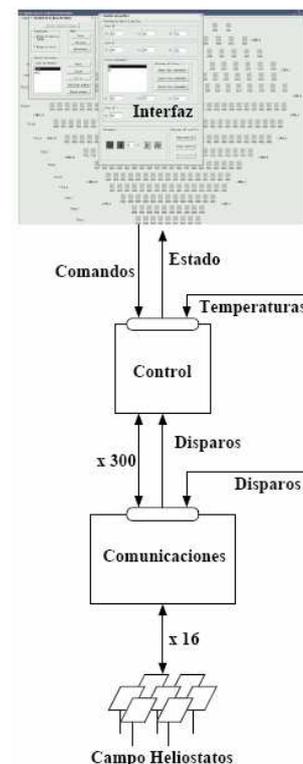


Figura 4.2. Esquema general de la aplicación para el campo CESA-I de la PSA

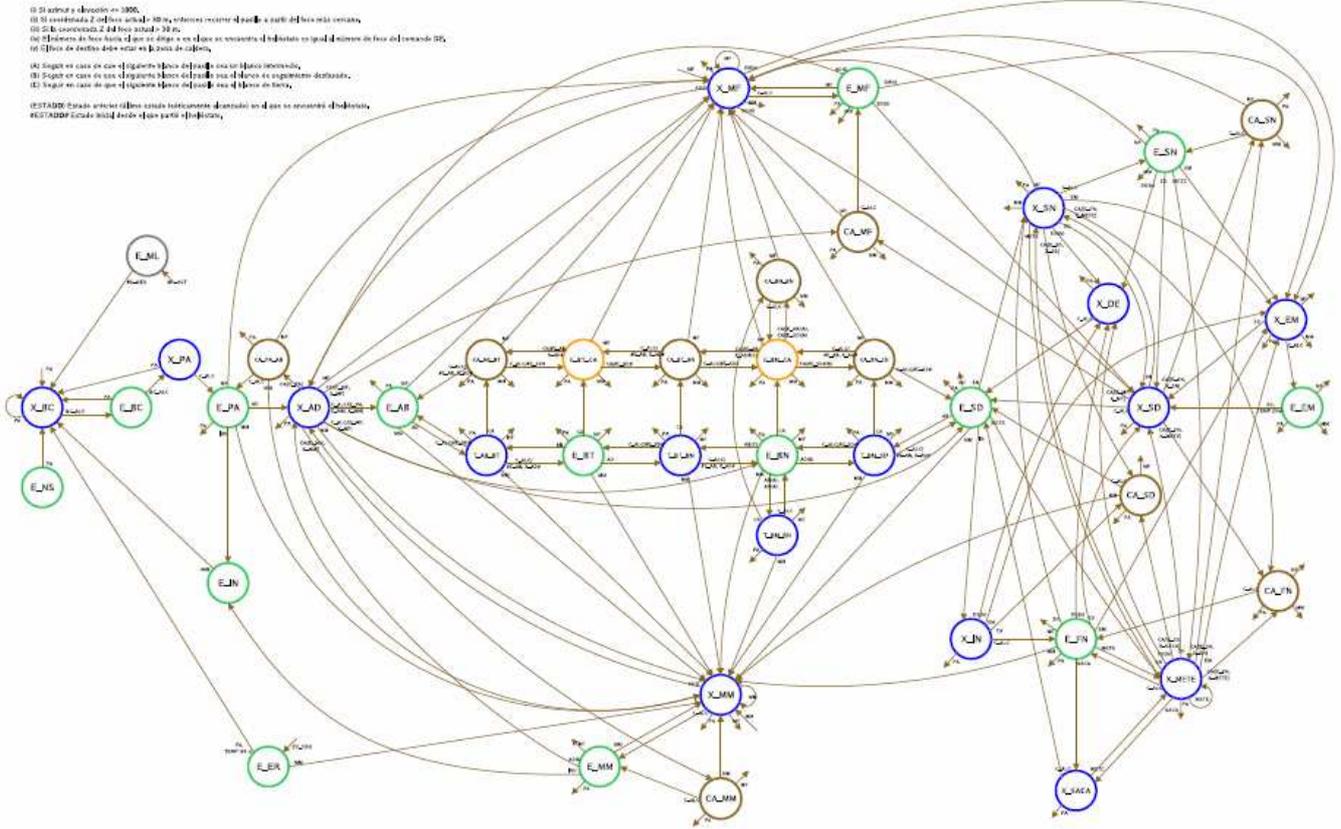


Figura 4.3. Máquina de estados finitos que define el comportamiento del heliostato

IV-A4. Los módulos de comunicaciones

Estos módulos, implementados como objetos pasivos, se encargan de gestionar las comunicaciones de todos los objetos heliostato conectados a una misma línea de comunicaciones. Puesto que un conjunto de objetos heliostato intentará comunicar a través de un mismo canal de comunicación, posiblemente al mismo tiempo, se deberá secuenciar de forma correcta el acceso al canal para evitar errores en las comunicaciones debidas a condiciones de carrera.

Aunque depende de la tecnología usada, normalmente las comunicaciones suponen un mensaje desde el control central hacia el control local del heliostato físico e inmediatamente la respuesta de este hacia el control central. Por tanto, mediante el uso de mutex se deben bloquear todas las peticiones de los objetos heliostato que intentan comunicar mientras un objeto heliostato comunica con su equivalente físico. Una vez que el objeto heliostato que bloqueaba el módulo de comunicación finalice, liberaría el mutex del módulo permitiendo a otro objeto heliostato acceder al canal de comunicación.

IV-A5. Interfaz de operador

Para la manipulación del campo de heliostatos se ha desarrollado una interfaz que será usada por un operador. Esta interfaz se encargara de gestionar los distintos tipos de ensayos disponibles para cada campo, de hacer llegar los comandos a los objetos heliostato y de mostrar información sobre éstos [34]. En la figura 4.4 se puede ver parte de la interfaz donde se aprecia, en el fondo, la pantalla principal mostrando el campo de heliostatos y, delante de ésta, dos ventanas que permiten

gestionar ciertos parámetros para los distintos ensayos del campo.

A parte de la ventana principal, que permite seleccionar conjuntos de heliostatos para su manipulación, y de las ventanas para gestionar las configuraciones de los ensayos, la interfaz gráfica también dispone de una ventana que emula una interfaz de comandos (similar a la que se proporciona en la interfaz de la aplicación usada actualmente en la planta) que permite enviar comandos al HFCS y de otra ventana para la modificación manual de los offsets.

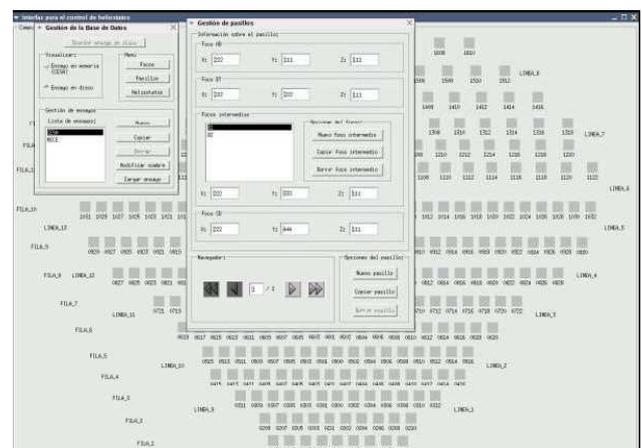


Figura 4.4. Interfaz gráfica usada por el operador para manipular el campo de heliostatos

IV-A6. Distribución de objetos

La figura 4.5 muestra el flujo de datos que existe en la aplicación, partiendo de la interfaz gráfica del operador hasta llegar al helióstato físico. Intuitivamente se pueden observar tres niveles en los que se podrán distribuir los objetos que forman la aplicación, que son los anteriormente descritos. Una distribución lógica podrá ser la de ubicar la interfaz gráfica en un computador y después asignar para cada modulo de comunicaciones y los helióstatos que lo usen a un computador. Sin embargo, esta opción requiere muchos computadores. La idea inicial es la de separar a la interfaz gráfica del resto de objetos en dos computadores, es decir, agrupar aquellos objetos que precisan de soporte de tiempo real estricto en un computador y la interfaz de usuario en otro computador [33].

IV-A7. Deficiencias del actual HFCS

Como ya es sabido, el actual HFCS dejará de ser operativo cuando finalice la instalación de los nuevos sistemas de control locales integrados en los helióstatos del campo CESA-I basados en Modbus. En una primera aproximación se consideró mantener el planteamiento y enfoque del actual HFCS pero fue desechado al considerar que este sistema carece de las mismas deficiencias de los sistemas de los años 80 basados en un potente ordenador central. Dicho control central (la aplicación) esta obligado a comunicarse con cada helióstato a periodos de tiempo constantes (al menos una vez cada 4 segundos) y ha de ser capaz de realizar para todos los helióstatos sus cálculos de consignas, los cálculos del vector solar y ha de mantener una máquina de estados por cada uno [7,8,19].

Esta forma de control sobre el campo de helióstatos conlleva una serie de inconvenientes que se podrían resumir en:

- El Control Local (CL) es un mero posicionador y depende estrictamente del Control Central (CC).
- El CC es un potente ordenador con gran capacidad de cálculo, aislado del resto de componentes de control. Los helióstatos son comandados manualmente por el operador para variar la potencia en el receptor.

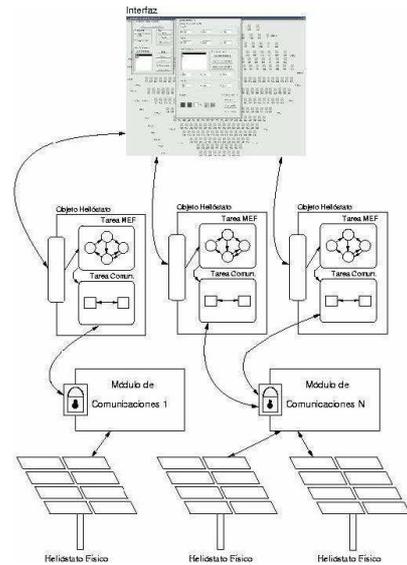


Figura 4.5. Flujo de información a través de los objetos de la aplicación

- La existencia de un problema en el CC supone una situación de riesgo crítica. De él depende la operación y la seguridad, y los helióstatos no pueden por sí solos decidir ni actuar ante emergencias.
- Una situación similar sucede ante un fallo en los controles de grupo.
- Se produce una situación crítica ante un fallo en las comunicaciones.

Este nuevo planteamiento se ve reforzado por el deseo de los responsables de la instalación de establecer un tipo de control análogo al que actualmente está operativo en el campo SSPS-CRS, en el que los helióstatos disponen de un control local más sofisticado con el que se pueden realizar los cálculos de las consignas de elevación y azimut a partir de unas coordenadas de seguimiento especificadas, lo que permite una cierta independencia del control central, el cual tendrá una

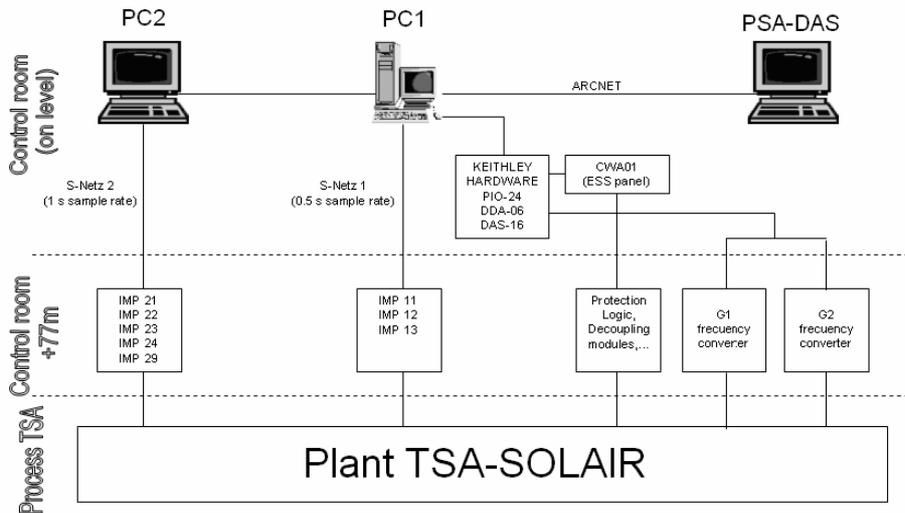


Figura 4.6. Esquema del sistema de control TSA-SOLAIR

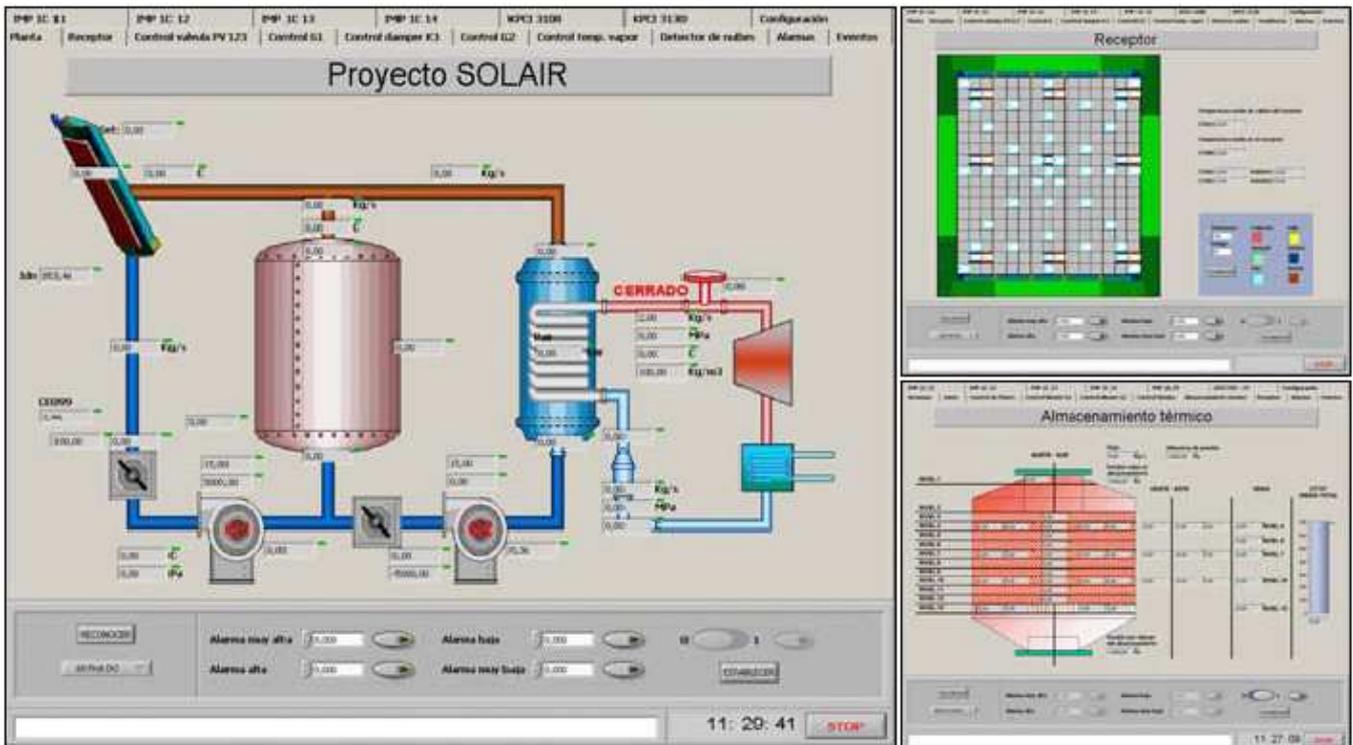


Figura 4.7. Pantallas del sistema de control del proyecto TSA-SOLAIR

función más orientada a la supervisión. Con ello se pretenderá probar e implantar un HFCS basado en estándares industriales de facto, como Modbus [9] y OPC [10], que permita la total falta de dependencia con sistemas propietarios [15].

IV-B. Sistema de Control del Receptor Central (CRCS)

El actual sistema TSA es controlado por un sistema de control digital (DCS). Este DCS consiste en dos PCs interconectados (llamados PC1 y PC2), los cuales se interconectan con el sistema TSA por medio de dispositivos de entrada/salida analógicos/digitales (E/S A/D). Ambos funcionan con un software comercial disponible de adquisición de datos y control llamado LabVIEW, de National Instruments que se ejecuta bajo Windows XP.

Como filosofía general, solamente un PC (PC2) puede utilizar los parámetros del proceso para su manipulación. El otro computador (PC1) realiza la una adquisición rápida de los datos del proceso y ejecuta los algoritmos del control en bucle cerrado. Los datos importantes se transmiten en ambas direcciones vía red. Habrá un tercer computador (llamado DAS) que se utiliza para guardar los datos de la operación y para el posterior análisis de estos datos una vez se haya terminado la operación.

Los dos computadores PC1 y PC2 se comunican entre ellos mediante una tarjeta de red, mientras están operando se envían recíprocamente algunas de las señales de las que le llegan para poder realizar cálculos o simplemente para mostrarlas por pantalla. Al mismo tiempo también están conectados por red a un tercer ordenador (llamado DAS) donde se guardarán los históricos una vez se hayan finalizado los ensayos diarios y donde se realizará el proceso de cálculo de medias y generación de gráficas (ver figura 4.6).

Además, el computador PC1 está conectado por el puerto serie a otro ordenador llamado μ VAX que se encarga del control del campo de heliostatos. PC1 le envía cada segundo a través del puerto serie cincuenta temperaturas al μ VAX para que este las evalúe, y desenfoca el campo de heliostatos en casos determinados. Este sistema adicional de parada de emergencia cableado (ESS – *Emergency Shutdown System*) realiza solamente funciones de seguridad, ya que se encarga del desenfoco de campo cuando alguna temperatura medida en el receptor excede de un límite establecido y lanzamiento del sistema de protección contra nubes cuando hay alguna transición de nubes para que no disminuya el flujo de aire caliente en el sistema.

Una vez arrancada la aplicación y los servidores en PC1 la pantalla que se muestra por defecto es la que se enseña en la parte izquierda de figura 4.7 y que corresponde a una vista general de la planta TSA con el receptor SOLAIR 3MW. Desde esta pantalla se podrán observar todas las principales señales del sistema, el dibujo que se encuentra en esta pestaña muestra un esquema completo del sistema donde se puede observar arriba a la izquierda el nuevo receptor, en medio el tanque de almacenamiento térmico, un poco más a la derecha el intercambiador de calor donde el aire caliente transformará el agua en vapor y a la derecha el generador, la bomba de agua y la válvula PV123. También se puede ver en el dibujo las soplantes G1 y G2 así como los reguladores K2 y K3. Desde esta pantalla no se puede interactuar con el sistema, solo observar los resultados de algunas de las señales más importantes de este.

En la parte superior derecha de la figura 4.7 se puede ver una vista frontal del receptor con los termopares que han sido instalados en sus copas cerámicas. El dibujo del receptor se encuentra a la izquierda, mientras que a la derecha se muestran

diferentes temperaturas medias calculadas, debajo de estos indicadores están situados los diferentes controles para configurar los colores con los que se quiere que se muestren los termopares.

En PC2 es digno de mención la pantalla con el esquema del tanque del almacenamiento térmico, ver parte inferior derecha de la figura 4.7, en esta se muestran las temperaturas de todos los termopares que se encuentran en dicho tanque. Estos termopares están ordenados por niveles, aparte de estas temperaturas también se muestran las medias de cada nivel que han sido calculadas por la aplicación.

Tanto en la interfaz de PC1 como en PC2, tiene pantallas donde se muestran las todas las variables del hardware que se encuentra instalado en cada ordenador, así como pantallas donde se representan las tendencias con la que van evolucionando dichos valores. También poseen una pantalla donde se muestran y configuran las alarmas del sistema, otra para mostrar y configurar los eventos del sistema y una última que sirve para almacenar los valores de las señales del sistema en archivos de texto.

IV-B1. Señales del sistema

En este apartado se expone un desglose de los sensores que son utilizados en el sistema TSA con su receptor SOLAIR 3 MW. En apartados siguientes, se mostrarán diagramas del sistema para que el lector conozca la situación exacta de dichos sensores dentro del sistema y pueda relacionar cada sensor con el nombre técnico con el que se le conoce. Por último se hará un listado con los sensores más significativos y una descripción de cada uno junto con sus unidades que puede ser de ayuda en la realización de futuros controles.

En la figura 4.8 se muestra la cantidad de sensores que hay en las diferentes partes del sistema TSA, también indica que magnitud física miden dichos sensores.

Debido al gran número de termopares que hay en diferentes elementos del sistema y para un conocimiento más detallado de la situación de dichos termopares en el receptor, el almacenamiento térmico y el generador de vapor, se va a proceder a proporcionar un listado más exhaustivo de los termopares en esos elementos:

- Termopares en el receptor: 37 absorbedor + 9 dentro de la doble membrana + 8 detrás de la doble membrana + 3 en la protección + 5 en la salida del aire caliente + 3 en la entrada del aire de retorno = 65

Medidas	Receptor / absorbedor	Almacenamiento	Generador de vapor	Sistema	Meteo CESA-I	PCS CESA-I	Total
Termopar (tipo K)	65	40	9	2	1		119
(Diff.) Presión aire		2	2	4	1	2	11
Presión agua/vapor			2				2
Flujo másico de aire				2			2
Flujo agua/vapor			2				2
Velocidad soplantes				2		1	3
Posición				2	1	1	4
Calorímetro	2						2
Pirheliómetro					1		1
							146

Figura 4.8. Sensores del sistema TSA

- Termopares del almacenamiento térmico: 31 para calcular la temperatura media del tanque + 5 para la entrada del aire caliente desde el receptor + 4 para la salida del aire = 40
- Termopares del generador de vapor: 4 en la entrada de aire del generador de vapor + 2 a la salida del aire en el generador de vapor + 1 después de la soplante G2 + 1 en la entrada de agua al generador de vapor + 1 a la salida del vapor del generador de vapor = 9

IV-B2. Esquema del sistema

En las figuras 4.9 y 4.10 se muestran los diagramas de todo el sistema TSA con las señales más importantes que se miden o se calculan en él. En los diagramas se podrá observar el sitio exacto donde se encuentran dichos sensores y relacionarlos con el nombre técnico de la magnitud física que miden [16].

IV-B3. Descripción de las señales de entrada

Se va a pasar a listar las señales de entrada que se pueden considerar influyentes a la hora de la realización de los diferentes lazos de control que se desean implantar en el sistema TSA. Cuando, como en este caso, se refieren a señales de entrada, son señales que van desde el proceso hasta el sistema SCADA.

1) Señales de entrada referentes al lazo de control de la temperatura media del aire de salida del absorbedor:

- CT060: Temperatura media del aire en el absorbedor, se calcula con las señales de los 37 termopares situados detrás del absorbedor (°C).
- CT015: Temperatura media del aire de salida del receptor, se calcula con las temperaturas del aire caliente en el tubo del embudo del receptor (°C).
- CT144: Temperatura media del aire de retorno al receptor, se calcula con las temperaturas del aire de retorno, estas temperaturas son las señales 'Th VOX' y se miden a través de la IMP 14 (°C).
- CT143: Temperatura media del aire debajo del almacenamiento térmico, se calcula con algunas de las temperaturas del nivel 13 del almacenamiento, más concretamente la CT138, CT139, CT141 y CT142 (°C).
- CP155: Presión después de la soplante G1 (Pa).
- DPG1: Diferencia de presión en la soplante G1, se calcula con la diferencia entre las señales CP155 y CP154 (Pa).
- CF161: Flujo másico de aire a través del receptor (kg/s).
- CE099: Señal proveniente de la célula situada en el campo de heliostatos para la detección de nubes (mA).
- CS181: Velocidad real de la soplante G1 (%).
- CG166: Apertura real del regulador K3 (%).

2) Señales de salida referentes al lazo de control de la potencia del aire de entrada al generador de vapor:

- Pair SG: Potencia del aire de entrada al generador de vapor. (kW).
- CT210: Temperatura media del aire de entrada al generador de vapor. (°C).

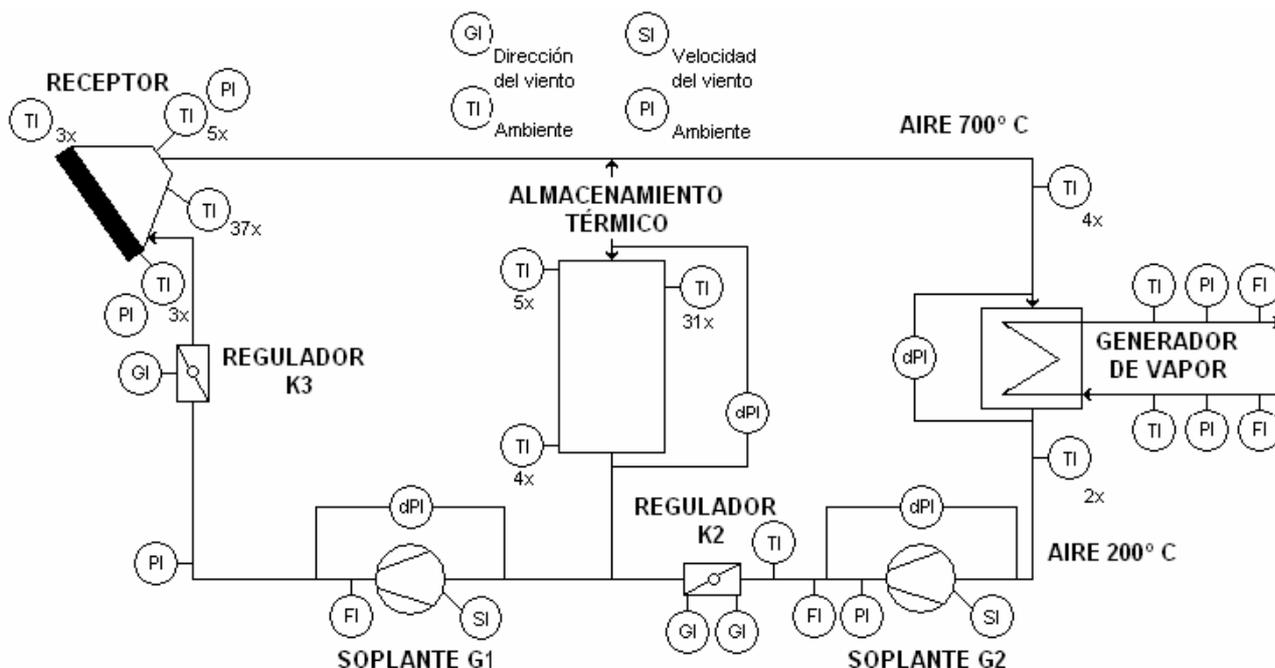


Figura 4.9. Situación y tipo de sensores

- CP154: Presión después de la soplaente G2 (Pa).
- DPG2: Diferencia de presión en la soplaente G2, se calcula con la diferencia entre las señales CP154 y CP222 (Pa).
- CF231: Flujo másico de aire a través del generador de vapor (kg / s).
- CS261: Velocidad real de la soplaente G2 (%).
- CG242op: Señal digital que indica que el regulador K2 se encuentra abierto (-).
- CG242cl: Señal digital que indica que el regulador K2 se encuentra cerrado (-).

3) Señales de salida referentes al control de la temperatura y de la presión de salida de vapor:

- CT210: Temperatura media del aire de entrada al generador de vapor. (°C).
- CP221: Presión del aire de entrada al generador de vapor: (Pa).
- CT211: Temperatura media del aire de salida del generador de vapor. (°C).
- CP222: Presión del aire de salida del generador de vapor: (Pa).
- CP223: Caída de presión en el generador de vapor, se calcula con la diferencia entre las señales CP222 y CP221. (Pa).
- CF231: Flujo másico de aire a través del generador de vapor (kg / s).
- CT208: Temperatura del agua de entrada al generador de vapor. (°C).
- CP224: Presión del agua de entrada al generador de vapor. (MPa).
- CF232: Flujo másico de agua a través del generador de vapor (kg / s).

- CT209: Temperatura del vapor de salida del generador de vapor. (°C).
- CP225: Presión del vapor de salida del generador de vapor. (MPa).
- CF233: Flujo másico del vapor de salida del generador de vapor (kg / s).

IV-B4. Descripción de las señales de salida

Lo mismo que en la sección anterior, pero referente a las señales de salida, se va a proceder a un listado de las que se consideran que pueden ser más significativas a la hora del desarrollo de futuros controladores para el sistema TSA. Son consideradas señales de salida las que salen desde el sistema SCADA hacia el proceso.

1) Señales de salida referentes al lazo de control de la temperatura media del aire de salida del absorbedor:

- CH171: Señal de consigna a la soplaente G1 para indicarle su velocidad (%).
- CH172: Señal de consigna al regulador K3 para indicarle su apertura (%).

2) Señales de salida referentes al lazo de control de la potencia del aire de entrada al generador de vapor:

- CH251: Señal de consigna a la soplaente G2 para indicarle su velocidad (%).
- CH252: Señal para abrir o cerrar el regulador K2.

3) Señales de salida referentes al lazo de control de la temperatura de salida de vapor:

- EA414: Señal de consigna a la bomba de agua de alimentación indicándole su velocidad (%).

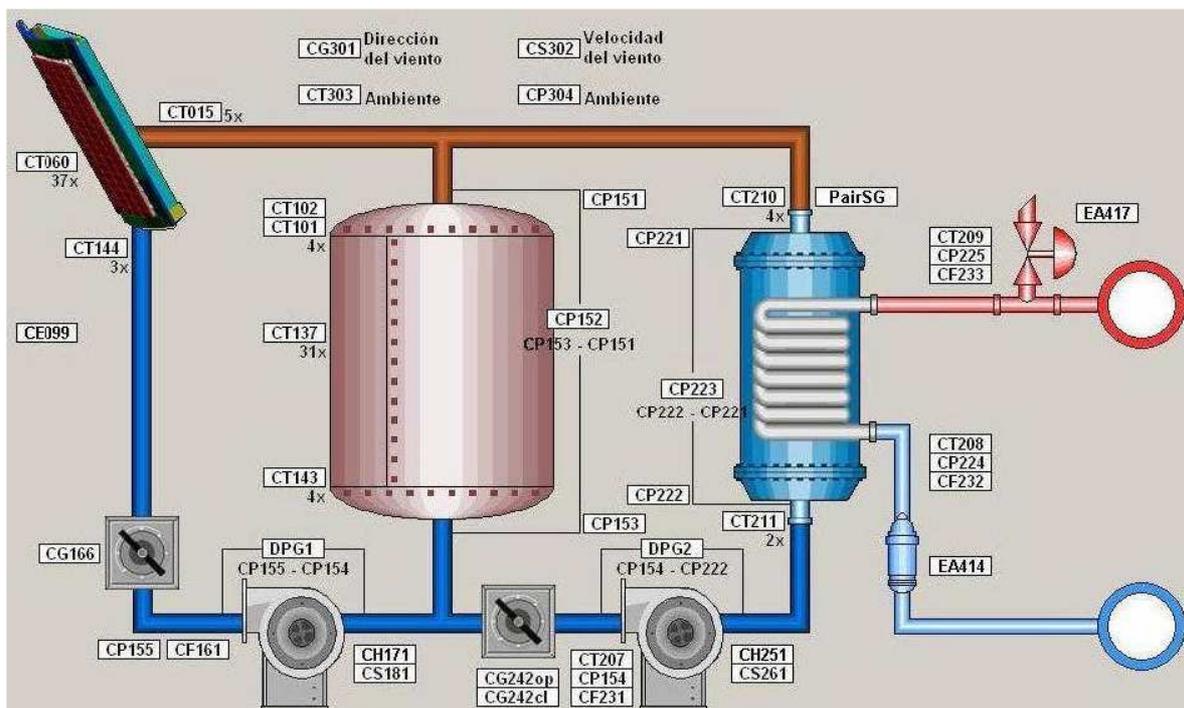


Figura 4.10. Situación y nombre de las señales que miden los sensores

4) Señales de salida referentes al lazo de control de la presión de salida del vapor:

- EA417: Señal de consigna a la válvula PV123 para indicarle su apertura (%)

IV-B5. Control del sistema TSA

Por último es necesario mencionar los cuatro algoritmos especiales de control que se utilizan para regular la producción del sistema TSA, que son [6,16]:

1) *Control de la temperatura del aire saliente del absorbido:* La temperatura de salida del aire del receptor depende de la energía incidente sobre el receptor (dictada por la radiación solar y la estrategia de apunte) y del flujo de aire a través de receptor. La estrategia de apunte está estructurada para proporcionar valores casi uniformes de la temperatura en el receptor, por lo que se pretende controlar es la temperatura de salida del aire del absorbedor variando el flujo total de aire a través del receptor, usando como controladores la soplante G1 y del regulador K3, que son activados a modo automático o manual al mismo tiempo. Este control de la temperatura se consigue mediante un controlador PID con anti-windup de la soplante G1 y regulador K3, junto con un controlador anticipativo que añade una señal de compensación de perturbación a la soplante G1 si una transición es detectada mediante un control fotoeléctrico situado en el campo.

2) *Control de la potencia del generador de vapor:* Para controlar la potencia producida por el generador de vapor a un valor determinado, se varía el flujo de aire que le entra al generador por medio de la soplante G2. Este control de

potencia se consigue mediante un controlador PID con anti-windup para la soplante G2.

3) *Control de la temperatura de salida del vapor:* Otro lazo importante es el de control de la temperatura del vapor de salida del generador de vapor del sistema SOLAIR 3MW. Actualmente para producir vapor se utilizan unas condiciones de temperatura y presión que son de 345 °C para la temperatura y 4,5 MPa para la presión en entrada a turbina. Para mantener la presión constante se utilizará la soplante G2. Una vez que ésta haya pasado a control automático y se haya estabilizado la presión del flujo de aire, se puede controlar la temperatura por medio de la variación del caudal de la bomba de alimentación de agua. En la planta TSA se utilizaba un control discreto de varias posiciones (los PID diseñados por la empresa encargada producían comportamientos oscilatorios).

4) *Control de la presión de salida del vapor:* Con este controlador se persigue mantener constante la presión de salida del vapor, haciendo uso de una válvula, que se abrirá o cerrará en función de la presión de vapor existente en las tuberías. La válvula se abrirá para liberar vapor a la atmósfera y sí disminuir la presión de éste. Este control se consigue mediante un controlador PID de la válvula de vapor.

Aunque todos los anteriores objetivos son valiosos a la hora de controlar el sistema TSA, no hay que perder de vista que el objetivo principal de todos, y por lo tanto el más importante, es generar vapor ininterrumpidamente a unas condiciones de temperatura y vapor previamente establecidas, para mandarlo luego a la turbina que forma parte del ciclo Rankine del sistema TSA. Por lo dicho anteriormente hay que hacer hincapié en los lazos de control tercero y cuarto, el control de la temperatura y de la presión de salida del vapor.

IV-B6. Deficiencias del actual CRCS

El actual SCADA cumple perfectamente con las especificaciones establecidas en su momento para el control del sistema, no obstante esas condiciones han cambiado como consecuencia de la actual remodelación de la etapa de potencia en la instalación. Se está cambiando la soplante (blower) G1 para poder trabajar con mayores temperaturas a la salida del almacenamiento térmico, con objeto de poder trabajar hasta con 400 °C. Este hecho tendrá como consecuencia directa la adaptación del SCADA a la nueva situación, mediante la integración de las nuevas señales provenientes de la remodelación. Adicionalmente esta problemática conllevará la revisión de los cuatro principales lazos de control encargados de regular la producción en el sistema TSA-SOLAIR. Estos cambios que se producirán en las señales provenientes de la etapa de potencia, unido a la actual remodelación del campo de heliostatos inmerso en la implantación de los nuevos controles locales inteligentes, han llevado a la decisión de modificar el actual SCADA que se tenía para adaptarlo a la nueva situación.

Estos dos motivos son más que suficientes para la modificación del actual SCADA del sistema TSA-SOLAIR, pero junto a estos hay que añadir la carencia apuntada por los responsables de la instalación con relación a la ausencia de control directo del campo de heliostatos desde el actual SCADA. Precisamente para cubrir este objetivo se abordó la primera parte de este trabajo fin de master con el desarrollo de un nuevo HFCS (Sistema de Control del Campo de Heliostatos) basado en tecnología OPC para poder integrarlo fácilmente en el SCADA del sistema TSA-SOLAIR.

Por otro lado, el RPSCS (Sistema de Control del Receptor Solar y su Etapa de Potencia) está perfectamente caracterizado por los cuatro lazos de control encargados de regular la producción en el sistema TSA-SOLAIR. Pero estos cuatro lazos están integrados estáticamente dentro del SCADA, por lo que este planteamiento es insuficiente para el propósito general de poder variar estas mismas estrategias de control dependiendo del tipo de ensayo que se quiera desarrollar en la instalación del TSA-SOLAIR.

Se hace por tanto necesario el desarrollo de una interfaz integrada dentro del SCADA del sistema TSA-SOLAIR que nos proporcione la posibilidad de poder ejecutar algoritmos de control (lazos de control) desarrollados por los especialistas en ingeniería de control. Para tal fin se tendrá que establecer un protocolo de comunicación entre el SCADA y el lazo de control, se tendrá que establecer la política de intercambio de parámetros entre ambos, se tendrá que dar la posibilidad de que los ingenieros de control puedan utilizar las herramientas más comunes para la implementación de estos algoritmos de control y por último se tendrá que dotar al sistema SCADA de los mecanismos de carga y configuración para la ejecución de los lazos de control.

Cumplido tal objetivo se tendrían cubiertas las necesidades de comunicación entre los dos subsistemas principales que forman el sistema TSA-SOLAIR, a saber el Sistema de Control de Campos de Heliostatos (HFCS) y el Sistema de Control del Receptor Central (CRCS), de tal forma que ya se podría desarrollar cualquier estrategia de control en el sistema de forma fácil y segura.

V. SISTEMA DE CONTROL DEL CAMPO DE HELIOSTATOS (HFCS)

El objetivo global del HFCS es generar una distribución de temperatura uniforme en espacio y tiempo en el receptor, para lo cual el HFCS posicionará cada heliostato del campo en las coordenadas de operación necesarias para tal fin.

Con el paso de los años el concepto de HFCS ha ido evolucionando paralelamente a como lo ha hecho su mínimo elemento operativo, el heliostato. En este sentido se puede destacar la evolución en el terreno del auto-control (heliostato inteligente), así como en su auto-suficiencia en el consumo eléctrico (heliostato autónomo).

Las principales características que se desea aprovechar con el nuevo HFCS basado en heliostatos inteligentes son:

- Los actuales microcontroladores permiten el traspaso de tareas desde el Control Central (CC) a los Controles Locales (CLs), aligerando de esta forma la carga de trabajo del CC.
- Los CLs asumen el cálculo del vector solar y de la reflexión y pueden controlar en todo momento su foco, aprovechando de esta forma su estatus de heliostato inteligente.
- El CC es descargado de tareas y puede dedicarse a efectuar estrategias más complejas de control de planta comandando los heliostatos para controlar automáticamente la distribución de temperaturas y/o potencia en el receptor.
- El CC es un interfaz de comunicaciones entre el campo de heliostatos y el sistema global de control de la Planta Solar (SCADA).
- Se reduce la dedicación de personal operador, ya que el campo de heliostatos evoluciona automáticamente ante las necesidades impuestas en la estrategia de control.
- El foco de un heliostato será controlado por el CL. Con ello se consigue ignorar los fallos en otros dispositivos de la planta que no afecta directamente al CL (al heliostato), consiguiéndose de esta forma mayor seguridad y funcionalidad.

Todo esto es gracias a las nuevas tareas soportadas por los controles locales [4]: a) cálculo del vector solar; b) corrección por refracción; c) corrección por paralaje; d) medida de las posiciones angulares; e) corrección por geometría; f) corrección de errores de montaje; g) control de posición; h) control de comunicaciones; i) envío de estados y datos; j) ejecución de ordenes y comandos; k) diagnóstico y autoprotección; l) parametrización; m) tareas de emergencia; n) pasillos de seguridad.

Como se puede observar se trata de un amplio abanico de tareas que aporta una gran autonomía al heliostato, eliminando la necesidad de potentes ordenadores para el control central y de tramas de comunicación complejas. Ello impide que un corte o deterioro de las comunicaciones pueda poner fuera de servicio, total o parcial, al campo de heliostatos, con la consiguiente pérdida de producción de la planta. En la figura

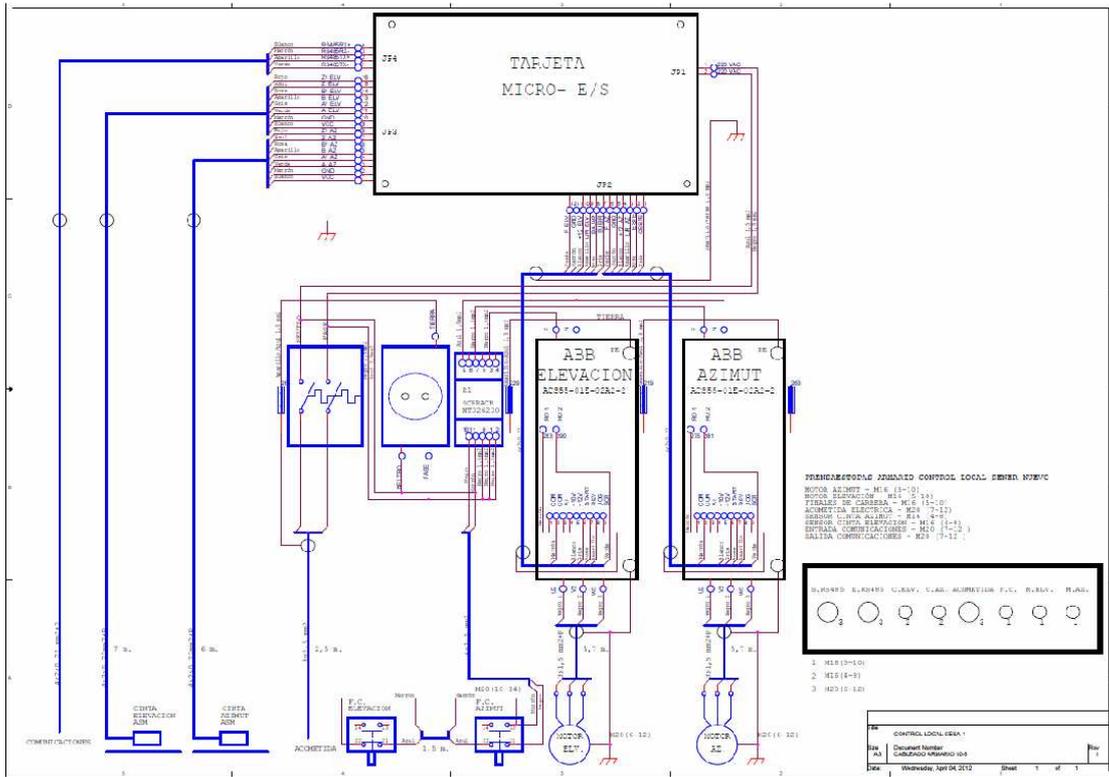


Figura 5.1. Esquema de conexionado del nuevo control local

5.1 se puede observar el esquema de conexionado de la última generación de controles locales desarrollados en la PSA y en la figura 5.2 su localización en la base del heliostato.

Por otro lado no se debe olvidar que el heliostato inteligente puede determinar la posición solar cada dos segundos, empleando un potente algoritmo astronómico que aporta un error menor de medio minuto de arco en la determinación del azimut y de la distancia cenital del sol. Este dato, unido a la gran resolución angular de los ejes, confiere al heliostato una gran calidad en el apunte. Otro motivo más por el que se apuesta por la descarga de esta tarea en el CC, reservando dicha potencia para efectuar estrategias más complejas de control de planta comandando los heliostatos de tal forma que se pueda controlar automáticamente la distribución de temperaturas y/o potencia en el receptor. Este es el gran segundo objetivo a cubrir.

V-A. Requisitos básicos de implementación en el HFCS

Tras varias reuniones con los responsables de la instalación y en coordinación con el departamento de Instrumentación y DAS de la Plataforma Solar de Almería (PSA), se establecen los siguientes requisitos básicos que ha de satisfacer el sistema de control del campo de heliostatos con objeto de establecer una primera versión operativa del mismo.

1) *Se quiere explotar al máximo el concepto de heliostato independiente.* Esto implica que este heliostato, equipado con un control local especialmente diseñado, puede funcionar sin la asistencia de ningún otro dispositivo externo,



Figura 5.2. Localización de un nuevo control local en la base del heliostato

pudiendo, por sí mismo, acometer las funciones de cálculo y guiado de sus ejes, manteniendo el foco controlado, así como velar por su propia integridad y seguridad.

2) *No existe una necesidad estricta de comunicación periódica entre el CC (la aplicación) con cada CL (helióstatos)*, reduciéndose prácticamente dicha comunicación a la transmisión de las ordenes de enfoque o desenfoque de los distintos heliostatos y al conocimiento previo de si dichos heliostatos están operativos para su funcionamiento. Se establece un tiempo máximo de 5s de latencia en la comunicación entre el CC y los distintos CLs que componen el campo de heliostatos.

3) *Se deberá adquirir un número determinado de muestras de temperatura y/o flujo en el receptor cada segundo.* Estos valores de muestra determinara la evolución del campo de heliostatos, ya que nos indicará que heliostatos han de ser enfocados/desenfocados al/del receptor. Estos valores también nos permitirán determinar la generación de alarmas o la necesidad de desenfocar todos los heliostatos cuando se sobrepasen ciertos límites establecidos.

4) *La necesidad de que todos los comandos ejecutados por los heliostatos tengan un tiempo máximo para su finalización queda garantizado gracias a la implementación intrínseca de los CLs.* Dichos controles son de diseño y desarrollo propio de la PSA, basados en un microcontrolador de Intel 80C32 asistido por un reloj mantenido por batería, el chip BQ32876, y por memorias del tipo RAM y ROM. El software de bajo nivel incorporado al microcontrolador de la placa incluye todas las funciones operativas más avanzadas en la PSA, así como los últimos algoritmos de cálculo solar. Con ello se asegura un control determinista en los CLs, por lo que se considera que ya no es necesaria la utilización de un sistema operativo en tiempo real en los HFCC (Control de Comunicaciones del Campo de Heliostatos) y por extensión en el HFCS.

5) *La aplicación que controla el HSFC ha de quedar abierta a futuras modificaciones y mejoras, así como dispuesta para poder funcionar con estándares industriales.* La intención es que el sistema sea lo más escalable posible, para lo cual se considera que la mejor opción es garantizar que todos sus elementos puedan ser cambiados o rediseñados lo más fácilmente posible mediante la adopción estricta de estándares industriales. Este mismo criterio fue el seguido a la hora de implantar Modbus como protocolo de comunicaciones en los CLs.

6) *Se debe de llevar a cabo una política de detección y gestión de alarmas y errores para supervisar el correcto funcionamiento de los heliostatos.* Aunque el concepto de heliostato inteligente no requiere un control exhaustivo de si mismo por parte de otro sistema de control, si es conveniente el conocimiento de dicha información para detectar posibles anomalías en su funcionamiento para su posterior corrección.

7) *El sistema de control ha de permitir la gestión y configuración de heliostatos de forma fácil y rápida,* tanto a nivel individual como colectiva mediante la creación de grupos de heliostatos.

V-B. Control de Comunicaciones del Campo de Heliostatos

Se introduce en el campo de heliostatos un nuevo elemento denominado Control de Comunicaciones del Campo de Heliostatos – Heliostat Field Communication Control (HFCC). Este módulo tendrá una doble funcionalidad.

1) *Concentrador de comunicaciones:* Por un lado harán las veces de concentradores de comunicaciones, encargándose de gestionar las comunicaciones de todos los heliostatos conectados a una misma línea de comunicaciones. Puesto que un conjunto de heliostatos intentara comunicar a través de un mismo canal de comunicación, posiblemente al mismo tiempo, se debería secuenciar de forma correcta el acceso al canal para evitar errores en las comunicaciones.

2) *Sectorización del campo de heliostatos:* El Control Central queda alojado en la sala de control y desde él se lanzaran las órdenes hacia los HFCC, los cuales serán los encargados de establecer la comunicación directa con los heliostatos y de recabar información de todos ellos. Aunque depende de la tecnología usada, normalmente las comunicaciones suponen un mensaje desde el HFCC hacia el CL del heliostato físico y la inmediata respuesta del CL hacia el HFCC. Con todo ello se consigue sectorizar un gran campo de heliostatos y se puede asegurar el trasiego de información, instalando tantos HFCC como sean necesarios a lo largo del campo de heliostatos.

En este caso en particular se opta como equipo para integrar el HFCC por utilizar un mini PC embebido del fabricante IEI (ver figura 5.3). Se trata del modelo ECW-281B-D525 y está dentro de la gama de productos de IEI para la automatización y el control industrial basados en PC

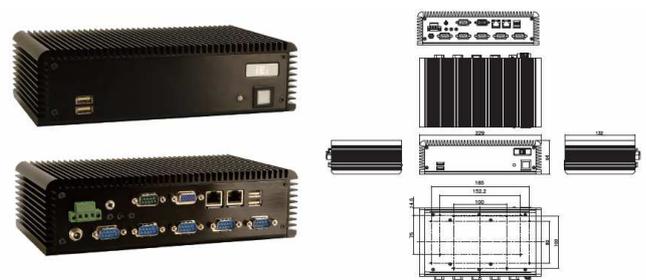


Figura 5.3. Mini PC embebido elegido para la implementación del HFCC

El ECW-281B-D525 utiliza el microprocesador Intel® Atom™ dual core D525 de 1,8 GHz y 1 MB de L2 cache. Es importante resaltar que aun con la elevada potencia de cálculo de este microprocesador, el equipo es fanless gracias a su bajo consumo y al chasis de aluminio, especialmente diseñado para que actúe como disipador de calor. En cuanto a los interfaces que ofrece el ECW-281B-D525 diremos que tiene: 4 puertos USB 2.0, 6 puertos RS-232/422/485, 2 puertos GigaLAN Realtek RTL8111E PCIe.

Estas dos últimas características son fundamentales para su elección como HFCC, ya que por un lado la comunicación con los heliostatos se realizará a través de una línea RS-485 a dos hilos de tal forma que se necesitará un puerto RS por cada línea

de helióstatos que se quiera controlar, estando compuesta cada línea por aproximadamente 20 helióstatos. Por otro lado la comunicación con el CC se realizará a través de ethernet industrial, y la existencia de 2 puertos GigaLAN nos garantiza una gran velocidad en el trasiego de información a la vez de ofrecernos la posibilidad de establecer redundancia en las comunicaciones.

Su rango de temperatura de trabajo es de -20 °C a 65 °C sin disco mecánico y con SSD con rango extendido de temperatura; con disco mecánico su rango es de -10 °C a 50 °C. Dichos rangos de temperatura se consiguen con flujo de aire en el exterior del equipo. Este dato también es importante ya que los HFCC estarán ubicados físicamente en el campo de helióstatos, optándose por la opción de no usar discos mecánicos.

V-C. Diseño del HFCS

Dadas las especificaciones y las necesidades planteadas, se determino la siguiente alternativa basada sobre todo en la utilización de estándares industriales (figura 5.4).

Se parte del establecimiento de Modbus como protocolo de comunicaciones en los controles locales (CLs). Modbus se ha convertido en un protocolo de comunicaciones estándar de facto en la industria, siendo uno de los goza de mayor disponibilidad para la conexión de dispositivos electrónicos industriales. Las razones por las cuales el uso de Modbus es superior a otros protocolos de comunicaciones son: a) es libre; b) su implementación es fácil y requiere poco desarrollo; c) maneja bloques de datos sin suponer restricciones.

Modbus permite el control de una red de dispositivos, por ejemplo un sistema de medida de temperatura y humedad, y comunicar los resultados a un ordenador. Modbus también se usa para la conexión de un ordenador de supervisión con una unidad remota (RTU) en sistemas de supervisión y adquisición

de datos (SCADA). Existen versiones del protocolo Modbus para puerto serie y Ethernet (Modbus/TCP).

En este caso particular los CLs integran Modbus RTU para puerto serie, en concreto RS-485. Modbus está basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor, por lo que los CLs hacen las veces de servidor a espera de la conexión remota del cliente que le suministre las consignas necesarias para su funcionamiento.

Para el HFCC se establecen como protocolos de funcionamiento Modbus para su comunicación con los distintos CLs que gestiona y OPC (OLE for Process Control) para su comunicación con el CC. OPC es otro estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos industriales, basado en una tecnología Microsoft, que ofrece un interface común para comunicación que permite que componentes software individuales interaccionen y compartan datos. Al igual que Modbus, la comunicación OPC se realiza a través de una arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor. El servidor OPC es la fuente de datos (como un dispositivo hardware a nivel de planta) y cualquier aplicación cliente basada en OPC puede acceder a dicho servidor para leer/escribir cualquier variable que ofrezca el servidor.

El problema histórico de los sistemas de control SCADA y DCS, de distintos fabricantes, ha sido que sus sistemas de datos tienen diferentes formatos y protocolos de comunicación. A ello se suma que redes industriales (SimaticNet, DeviceNet, etc.) y Buses de Campo (Modbus, Profibus, etc.), son incompatibles en comunicación originando problemas como:

- Arquitectura propietaria centralizada, con baja flexibilidad y características de integración con otros fabricantes.
- Ninguna garantía de interoperabilidad entre sistemas propietarios.

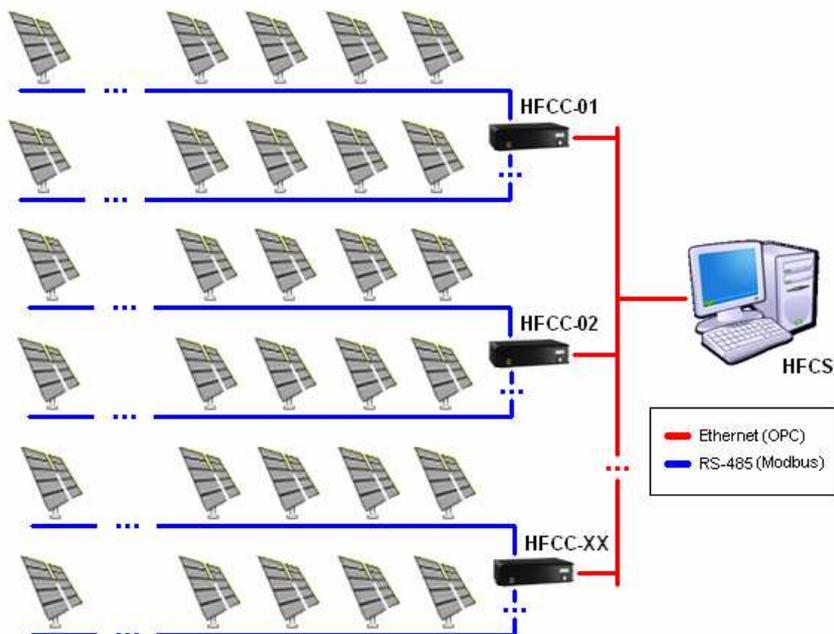


Figura 5.4. Arquitectura implementada para el control del campo de helióstatos

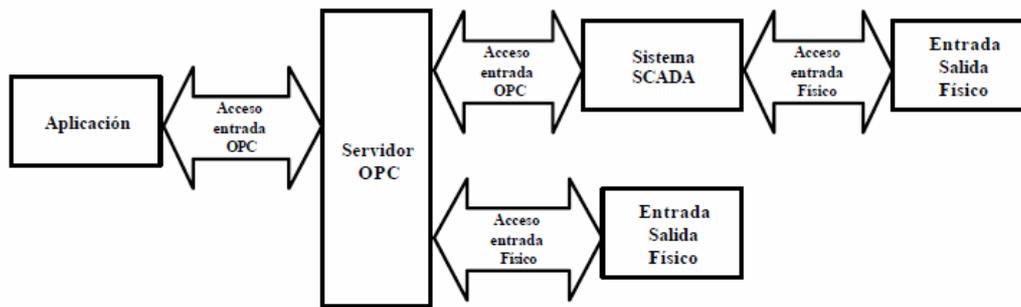


Figura 5.5. Relación cliente/servidor y sistemas SCADA

- Al ser sistemas propietarios presentan un elevado costo de integración en Software y Hardware (Duplicación de esfuerzos).

OPC es una solución abierta y flexible al clásico problema de los drivers propietarios, ya que permite de forma simple la integración de distintos sistemas heterogéneos. Prácticamente todos los mayores fabricantes de sistemas de control, instrumentación y de procesos han incluido OPC en sus productos. Estos dos últimos motivos avalan en firme su elección como protocolo principal de comunicaciones en nuestro sistema.

En este caso particular los HFCC integraran un servidor OPC encargado por una parte de ser el cliente Modbus que se conectará con todos los CLs de su entorno y por otra se encargará de aceptar las peticiones del cliente OPC localizado en el HFSC para la gestión íntegra del campo de helióstatos.

Para el HFCS se establece OPC como protocolo único de comunicaciones, implementándose en una primera aproximación un cliente OPC cuyo objetivo es conectar con los distintos servidores OPC de los HFCC. No obstante y tras considerar que uno de los requerimientos básicos del sistema a desarrollar es la intención de hacerlo lo más escalable posible, se optó por desarrollar un servidor OPC cuyo objetivo es por un lado ser cliente de todos los servidores OPC de los HFCC y por otro hacer exportables todas las variables de los HFCC (y por extensión de los CLs). De esta forma conseguiremos implementar un sistema extremadamente escalable en el sentido de que será posible crear tantos servidores OPC como necesidades se vayan generando en nuestro sistema.

Planteadas esta arquitectura, y aprovechando el potencial que nos ofrece OPC, se aborda la descentralización de todas las tareas principales que ha de desarrollar nuestro SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) en distintos servidores OPC que cubran nuestras necesidades. De esta forma el sistema SCADA a desarrollar sólo tendrá que comunicarse con cada uno de estos servidores OPC (ver figura 5.5) para obtener y/o proveer información de los dispositivos de campo asociados (helioestatos).

Así pues se plantea el desarrollo de los distintos servidores OPC basándose en las propias especificaciones técnicas definidas por la OPC Foundation que definen los tres principales tipos de servidores OPC, que son los siguientes:

- Servidor OPC-DA. Basado en la especificación de Acceso a Datos, especialmente diseñado para la transmisión de datos en tiempo real.
- Servidor OPC-HDA. Basado en la especificación de Acceso a Datos Históricos que provee al cliente OPC HDA de datos históricos.
- Servidor OPC-A&E. Basado en la especificación de Alarmas y Eventos – transfiere alarmas y eventos desde el dispositivo hacia el cliente OPC A&E.

No obstante dada la envergadura del proyecto y su necesidad de puesta en marcha lo más rápidamente posible, en una primera fase se opta por el desarrollo del servidor OPC-DA que será el encargado de comandar el campo de helióstatos, dejando para una fase posterior la implementación de los servidores OPC-HDA y OPC-A&E. La responsabilidad del guardado y mantenimiento del volumen de datos generado, así como de la gestión de las alarmas y eventos quedará a cargo del actual sistema SCADA del proyecto TSA-SOLAIR. Este sistema de control basado en LabVIEW, por lo que se aprovechará del potencial que nos ofrece a la hora de proporcionar utilidades para registro de datos y manejo de alarmas y eventos, así como tendencias históricas y en tiempo real. El uso de LabVIEW como herramienta de programación gráfica y desarrollo de interfaces para operación de procesos nos proporciona unos resultados excelentes en cuanto a facilidad, rapidez y calidad del resultado final.

V-D. OPC

OLE for Process Control (OPC) es un estándar para la comunicación de numerosas fuentes de datos, bien sean dispositivos de campo en una industria o bien una base de datos en una habitación de control.

OPC ofrece un mecanismo común mediante el cual las aplicaciones pueden acceder a los datos de cualquier fuente de datos, ya sea un dispositivo o una base de datos. Hay muchas aplicaciones clientes que requieren datos de una fuente de datos y que para ello requieren del desarrollo de drivers propios. Esto lleva a los siguientes problemas:

- 1) *Mucho esfuerzo de duplicación.* Cada uno debe escribir un driver para cada vendedor de hardware particular.

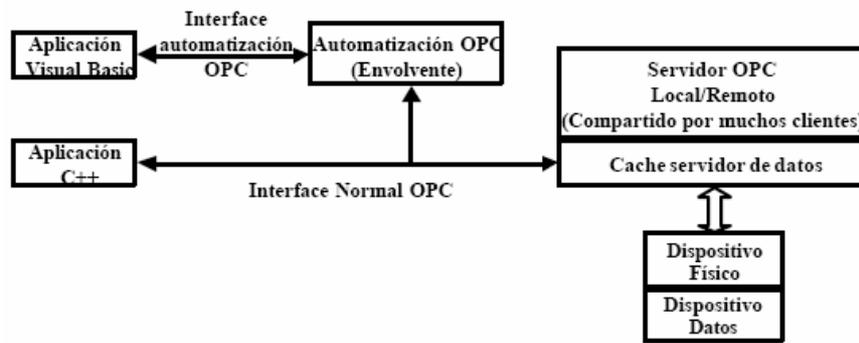


Figura 5.6. Arquitectura típica OPC

2) *Inconsistencias entre drivers de los vendedores.* Existen características de ciertos dispositivos hardware que no son soportadas por todos los desarrolladores de drivers.

Dos paquetes no pueden acceder generalmente al mismo dispositivo simultáneamente ya que cada uno contiene drivers independientes. Los fabricantes de hardware intentan resolver estos problemas desarrollando drivers, pero son entorpecidos por las diferencias entre los protocolos de los clientes.

OPC establece una línea entre los proveedores de hardware y los desarrolladores de software. Esto proporciona un mecanismo para proporcionar datos desde una fuente de datos y comunicar los datos a cualquier aplicación cliente de una forma estándar. Un vendedor puede desarrollar un servidor muy optimizado y reusable para comunicar las fuentes de datos. Proporcionar el servidor con un interfaz OPC permite a cualquier cliente acceder a sus dispositivos. Los fabricantes escribirán componentes software en C y C++ para encapsular las características del acceso a los datos de un determinado dispositivo, de forma que los desarrolladores de aplicaciones puedan escribir código en el lenguaje de programación que consideren más oportuno para utilizar los datos de la planta industrial.

El propósito de todas las especificaciones es facilitar el desarrollo de servidores OPC en C y C++, y facilitar el desarrollo de aplicaciones clientes OPC en el lenguaje escogido. Aunque también se intenta que los servidores OPC sean desarrollados en otros lenguajes. OPC se ha diseñado para permitir a las aplicaciones clientes acceder a la planta industrial de una manera consistente. Si se produce una aceptación amplia en la industria, OPC proporcionará muchos beneficios.

Los fabricantes de hardware solo tienen que fabricar un conjunto de componentes software para inicializar sus aplicaciones. Los desarrolladores de software no tendrán que reescribir drivers debido al cambio de características o incorporaciones en una nueva versión de hardware. Los compradores obtienen más opciones con las que implementar su sistema de producción integrado en clases.

V-E. Implementación del servidor OPC-DA

Como es bien conocido, OPC es un mecanismo estándar de comunicación, que interconecta en forma libre, numerosas fuentes de datos donde se incluyen dispositivos de planta en la fábrica. Su principal ventaja radica en la definición intrínseca de su arquitectura: es de comunicación abierta y se centra en el

acceso a datos y no en el tipo de datos. Esto facilita enormemente el trasiego de información a través del sistema, permitiendo crear una pasarela de datos entre dos o más servidores OPC sin importar los fabricantes.

Para la implementación de los distintos servidores OPC se ha optado por utilizar un desarrollo lo más estándar y básico posible, por lo se ha decidido realizarlo en C++ utilizando el entorno de desarrollo Visual C++ 6.0 de Microsoft. Puntos importantes que motivaron esta decisión fueron la naturaleza propia de la arquitectura OPC por estar basada en el sistema DCOM (Distributed Component Object Model) de Microsoft y porque la librería SDK (Software Development Kit) para el desarrollo de servidores y clientes nativos de OPC de la OPC Foundation - OPC Core Components 3.00.101 SDK – está desarrollada en esta misma plataforma.

La arquitectura OPC es un modelo Cliente-Servidor donde el Servidor OPC proporciona una interfaz al objeto OPC y lo controla. Una aplicación cliente OPC se comunica a un servidor OPC a través de un cliente OPC específico por medio de una interfaz de automatización. El servidor OPC lleva a cabo la interfaz cliente, y opcionalmente lleva a cabo la interfaz de automatización (ver figura 5.6).

A nivel conceptual, el funcionamiento de un servidor OPC se puede desglosar en tres módulos (figura 5.7):

1) *Módulo de comunicaciones OPC.* Esta es la parte del Servidor OPC responsable de comunicar adecuadamente con un Cliente OPC. Los Servidores OPC bien diseñados deben ser plenamente compatibles con las especificaciones OPC que implementen, para asegurar que comunican correctamente con cualquier Cliente OPC.

2) *Módulo de comunicaciones nativas.* El Servidor OPC debe emplear el método de comunicación más eficiente con la Fuente de Datos. En algunos casos, esto implica comunicar con la Fuente mediante su protocolo propietario de datos, mientras que en otros casos, esto significa comunicar a través de una Interfaz de Programación de la Aplicación (API). Típicamente, cuanto más experiencia tenga el desarrollador del Servidor OPC con el dispositivo, mejor utilizará las posibilidades de comunicación que ofrece el dispositivo.

3) *Módulo de traducción/mapeado.* La función de este módulo es interpretar de forma adecuada las peticiones OPC entrantes de un Cliente OPC, convirtiéndolas en peticiones nativas que se envían a la Fuente de Datos y viceversa. Si esto

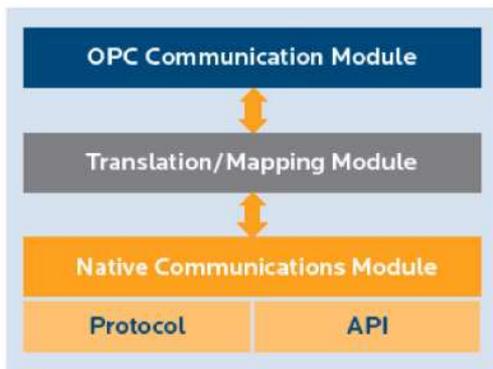


Figura 5.7. Anatomía conceptual de un Servidor OPC

se hace eficientemente, se puede mantener al mínimo la carga sobre la Fuente de Datos mientras se maximiza la capacidad de transmisión de datos.

A nivel de programación, un servidor OPC es una aplicación de software (driver) que ha de implementar los 3 módulos conceptuales anteriormente descritos. Para conseguir este objetivo la OPC Foundation establece una serie de especificaciones basadas en la creación dinámica de una o más interfaces que satisfagan dichas especificaciones. Para simplificar esta dinámica de trabajo se ha optado por la creación de un Wrapper DLL, de tal forma que simplifique al máximo la creación del servidor OPC centrándonos única y exclusivamente en las comunicaciones nativas y en la definición y mantenimiento de las variables compartidas por el servidor.

Para la creación del Wrapper DLL se ha optado por la utilización de la librería LightOPC v0.888 – The Free OPC Server Toolkit (<http://www.ipi.ac.ru/lab43/lopc-en.html>), que se trata de un Toolkit gratuito en código abierto para el desarrollo de servidores OPC. Esta librería ha sido elaborada por un grupo de académicos rusos y ha sido publicado bajo la licencia GNU LGPL. Su verdadero potencial radica en que está desarrollada en el más puro C estándar, siendo fácil de usar, rápido de integrar y ha sido extensamente testeada por lo que su funcionamiento está garantizado.

Gracias a la utilización de esta librería, se han podido cubrir las necesidades del Módulo de comunicaciones OPC y del Módulo de traducción/mapeo, por lo que sólo quedará por cubrir el Módulo de comunicaciones nativas que satisfaga la comunicación con la instrumentación particular a cada caso. Como valor añadido, y dado que la configuración de cualquier

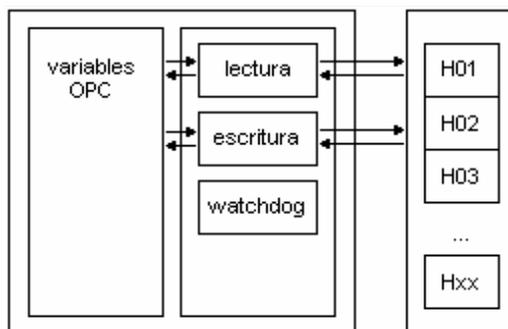


Figura 5.8. Estructura básica del servidor OPC-DA implementado

servidor OPC es complicada a nivel de sistema operativo, se ha optado por la integración en la Wrapper DLL de las funciones necesarias para que cualquier servidor OPC sea instalado como servicio nativo de Windows, simplificando de esta forma la configuración de acceso a nivel de seguridad OPC y haciéndola más robusta.

Un dato que no se puede olvidar a la hora de la implementación del módulo de comunicaciones nativas es que la comunicación entre el cliente OPC y el servidor OPC son bidireccionales, lo que significa que los clientes pueden leer y escribir en los dispositivos a través del servidor OPC. Esto puede provocar condiciones de carrera a la hora de acceder a un recurso compartido (estructura de datos o dispositivo) al no poder ser accedido por más de un proceso o hilo (thread) en ejecución, lo que a nivel de programación concurrente se conoce como sección crítica. Sólo un proceso o hilo puede estar en una sección crítica a la vez, y para garantizar esto mismo se utilizará el método más común para que dos procesos o hilos accedan al mismo tiempo a un recurso, la exclusión mutua.

V-E2. Estructura del servidor OPC-DA

Este servidor OPC estará instalado en el Control de Comunicaciones del Campo de Helióstatos y se encargará de la gestión de las distintas líneas de helióstatos, dadas las características técnicas del HFCC podrá hacerlo con un máximo de 8 líneas ya que precisamente este es el número máximo de puertos series que posee. Para cada línea la única limitación viene establecida por el estándar RS-485 según el cual se admite hasta 32 estaciones en 1 solo hilo, con una longitud máxima de 1200 metros operando entre 300 y 19200 bit/s y la comunicación half-duplex (semiduplex). Por tanto el estándar RS-485 soporta 32 transmisiones y 32 receptores en relación a la distancia máxima, y para nuestro caso concreto serán 32 helióstatos.

El servidor OPC ha sido concebido como servicio nativo de Windows para facilitar su instalación y configuración, así como para poder dotar al servidor de todas las ventajas de los servicios a nivel de SO. De entre todas se puede destacar la posibilidad del establecimiento de acceso a los recursos del sistema como usuario SYSTEM, lo cual nos confiere un acceso sin ningún tipo de restricción a todos los recursos. Esto simplifica enormemente la estructura del código que implementa el servidor OPC ya que no es necesario utilizar ningún tipo de autenticación ni cambio de privilegios en su ejecución.

Básicamente el servidor OPC desarrollado se puede dividir en 3 secciones principales:

1) *Arranque del servidor.* En esta sección se crea y arranca el servicio asociado a nivel de sistema operativo, se crea y arranca el servidor OPC en el sistema, se registran las variables que el servidor OPC hará públicas para que cualquier cliente OPC pueda acceder a ellas y por último se inicializa el dispositivo que será controlado por el servidor OPC.

2) *Acceso al dispositivo.* Esta sección es la encargada de acceder a bajo nivel al dispositivo que controla el servidor OPC. No se debe olvidar que las comunicaciones entre el cliente OPC y el servidor OPC son bidireccionales, por lo que

se hace necesario arrancar dos hilos (thread) independientes que realicen las funciones de lectura y escritura sobre el dispositivo controlado.

3) *Parada del servidor.* Por último esta sección libera el dispositivo utilizado, para el servidor OPC y por último para el servicio a nivel de SO.

Para la sección de acceso al dispositivo, se hace necesaria la implementación de las rutinas para el acceso al dispositivo controlado a nivel del protocolo Modbus. Nuevamente se evalúan las distintas opciones disponibles en el mercado y se opta por la utilización de la librería libmodbus v3.0.3 (<http://libmodbus.org/>), que se trata de otro Toolkit gratuito en código abierto para el envío y recepción de datos mediante el protocolo Modbus. Esta librería ha sido publicada bajo la licencia GNU LGPL, está escrita en C estándar y soporta RTU (puerto serie) y las comunicaciones TCP (Ethernet).

Como valor añadido también se ha incorporado en la Wrapper DLL un mecanismo de watchdog mediante el cual se garantiza el reseteo del servicio OPC en caso de que éste se haya bloqueado a la hora de acceder a bajo nivel al dispositivo en las operaciones de lectura y escritura. En la figura 5.8 se representa la estructura básica utilizada para la creación de los distintos servidores OPC que controlarán los heliostatos.

V-E3. Implementación del servidor OPC-DA compacto

Dado que el campo de heliostatos estará formado por un gran número de los mismos, se ha considerado conveniente la creación de dos servidores OPC para el seguimiento y control de dicho campo. El objetivo que se persigue es simplificar al máximo el trasiego de información por todo el bus de campo, ya que la carencia de este tipo de gestión en su acceso supondría una saturación del mismo.

Por un lado se implementa un servidor OPC que se encargará de recabar la información básica de los distintos heliostatos junto con la posibilidad de poder enviar una serie de comandos básicos para su funcionamiento, y por otro lado se implementa un servidor OPC de acceso genérico a Modbus para conseguir un control absoluto sobre los controles locales de los heliostatos. La gran diferencia entre ambos está en la cantidad de información que ambos ofrecerán y en el tiempo de refresco a la hora de obtener dicha información.

En la mayoría de las ocasiones, incluso durante la operación del campo de heliostatos, será más que suficiente

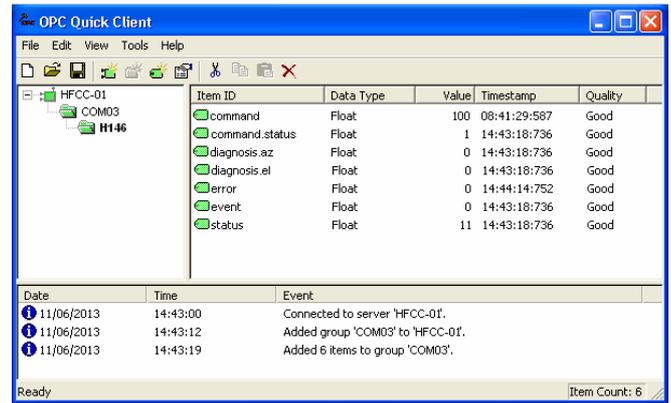


Figura 5.9. Acceso al servidor OPC-DA compacto del HFCC a través de un cliente OPC estándar

conocer el estado de cada uno de los heliostatos, sin necesidad de conocer las posiciones absolutas de los ejes o cualquier otra información adicional. Dicha información se denomina información básica y queda reflejada en cuatro variables:

- 1) *Evento/aviso:* nos informará de forma codificada de los eventos registrados durante el funcionamiento del heliostato.
- 2) *Error:* nos informará de forma codificada de los errores registrados en el heliostato.
- 3) *Diagnóstico en elevación y en azimuth:* nos informarán de las anomalías o averías registradas en cada eje del heliostato.
- 4) *Estado:* contiene la información codificada referente al estado del heliostato.

No obstante como valor añadido se ha considerado la conveniencia de incorporar al servidor OPC la posibilidad de ejecutar una serie de comandos para maniobrar el heliostato de forma básica, incluyendo la maniobra de abatimiento ante situaciones de emergencia. Para tal efecto se ha incorporado una variable denominada *command*, y para la comprobación de que cualquier comando enviado al heliostato ha sido aceptado y ejecutado se ha incorporado la variable *command.status*. En la figura 5.9 se observa la forma en la que un cliente OPC accede a los datos básicos de un control local definidos en el servidor OPC-DA compacto, mientras que en la tabla 5.10 se listan los comandos implementados para el servidor OPC-DA compacto.

Identificador	Descripción
a	Maniobra de abatimiento sin seguir el pasillo de seguridad
b	Bajar a abatimiento siguiendo el pasillo de seguridad
d	Ir seguimiento desfasado
e	Ir a seguimiento normal (enfoco a caldera)
i	Inmovilizar heliostato
n	Ir a seguimiento normal (máxima captación FV)
q	Ir a foco de emergencia (quitar heliostato)
r	Restaurar fallo
s	Subir a seguimiento desfasado por pasillo de seguridad

Figura 5.10. Comandos incorporados en el OPC-DA compacto

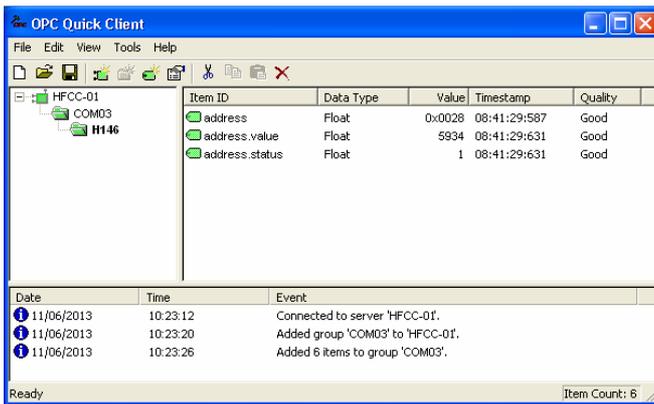


Figura 5.11. Acceso a la variable de la posición en azimut del heliostato a través del servidor OPC extendido

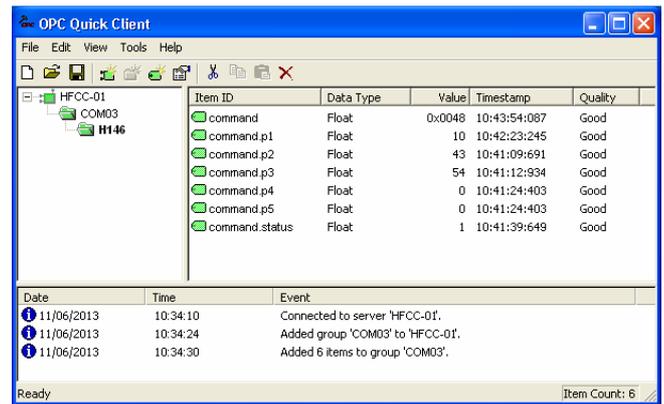


Figura 5.12. Asignación de la hora y desfase de la hora solar en el heliostato

La variable `command` será la única de escritura y por extensión de tipo asíncrono, ya que dada la importancia de esta variable se desea que sean aceptadas y tratadas las peticiones lo antes posible. Por tanto, el resto de las variables serán de lectura y de tipo síncrono, siendo el tiempo actualización fácilmente configurable mediante el fichero de configuración del servidor OPC. Dado que el tiempo utilizado por los controles locales para el cálculo de la posición del sol va en intervalos regulares de dos a diez segundos (dependiendo de las prestaciones exigidas al heliostato y de su proximidad o lejanía de éste a la torre), se establece por defecto a 2 segundos el tiempo de refresco de las variables del servidor OPC.

V-E4. Implementación del servidor OPC-DA extendido

Son más de 100 los parámetros que definen un heliostato, por lo que en lugar de definir tal cantidad de variables en el servidor OPC-DA se ha optado por dotar al servidor de un mecanismo genérico para el acceso selectivo a tales variables basado en el direccionamiento Modbus implementado en el control local de los heliostatos.

Así pues, para el acceso a las distintas direcciones Modbus se define una variable OPC denominada `address` y para acceder

al valor asociado a esa dirección se define la variable `address.value`. Basta con asignar dinámicamente un valor a la variable `address` para que automáticamente se obtenga el valor asociado en dicha dirección modbus en la variable `address.value`. También se define una variable denominada `address.status` que nos indicara si el acceso ha sido realizado correctamente. En la figura 5.11 se puede observar el procedimiento de acceso a una variable del control local a través del servidor OPC-DA extendido.

Este procedimiento es válido para todas las variables de lectura/escritura de nuestro servidor OPC, pero también se debe de establecer un procedimiento para poder enviar comandos de operación al heliostato. Esto lo conseguimos mediante la definición de una variable OPC denominada `command`, esta variable contendrá la solicitud de una petición al CL del heliostato a través de un ID y para suministrar los parámetros asociados al comando se definen 5 nuevas variables denominadas `command.p1`, `command.p2`, ..., `command.p5`, junto a estas variables se definen otras 5 variables que establecerán el tamaño del tipo de dato correspondiente a los parámetros (), denominadas `command.t1`, `command.t2`, ..., `command.t5`. Al igual que en los casos anteriores, se define una

Identificador	Parámetros	Descripción
f	n	Ir a foco definido como número n (0 a 11)
	x	Ir a foco de coordenadas x, y, z
	y	
	z	
m	az el	Mando manual a posición az, el
p	n	Ir a punto significativo con número n (0 a 7)
x	p	Cambia a p en mm la coordenada x del foco caldera
y	p	Cambia a p en mm la coordenada y del foco caldera
z	p	Cambia a p en mm la coordenada z del foco caldera
F	n	Asigna al foco n las coordenada x, y, z
	x	
	y	
H	hh	Asigna nueva hora y desfase con hora solar
	mm	
	Ss	
	d	

Tabla 5.13. Algunos comandos incorporados en el OPC-DA extendido

variable `command.status` que nos indicara si el comando enviado al heliostato ha sido aceptado y ejecutado Este procedimiento genérico de acceso a las variables del control local del heliostato responde a una filosofía de simplificación a la hora de acceder a las variables definidas en el servidor OPC. Esta misma filosofía se ve potenciada si se considera que el acceso a la inmensa mayoría de estas variables definidas en el heliostato solo se realiza en momentos muy puntuales (normalmente en la puesta en marcha y parada del campo de heliostatos), por lo que no se considera necesario crear una variable OPC por cada parámetro definido en el heliostato. Un ejemplo de ejecución de comandos a través del servidor OPC-DA extendido se puede observar en la figura 5.12, mientras que en tabla 5.13 se listan algunos comandos soportados por el servidor OPC-DA extendido junto a sus parámetros.

Para este servidor OPC no es necesario establecer un periodo de tiempo fijo en la consulta de los heliostatos para la actualización de las variables que comparte, ya que este conjunto de variables definidas responde a las peticiones asíncronas de los distintos clientes OPC que quieran obtener los valores de ciertas variables en momentos concretos a lo largo del control del campo de heliostatos.

V-F. Implementación del HFCS

Dado que la problemática de acceso a los distintos controles locales queda resuelta mediante la implementación de los distintos servidores OPC, la problemática de la creación de un SCADA que controle el campo de heliostatos queda también cubierta mediante la integración de la tecnología OPC en el entorno de desarrollo de las herramientas para la implementación de un sistema SCADA. Esta problemática queda más que ampliamente cubierta ya que cualquier herramienta del mercado actual queda integrada de facto con el estándar industrial OPC.

Como el último objetivo es la integración de los dos subsistemas principales que forman el sistema de control del proyecto TSA-SOLAIR, el control de campos de heliostatos (HFCS) y el control del receptor central y su etapa de potencia (RPSCS), se opta en una primera fase del proyecto por la integración de ambos subsistemas dentro del SCADA del

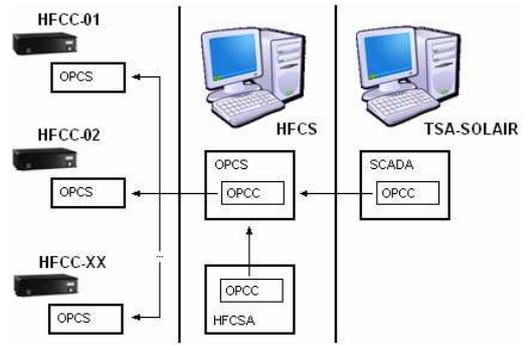


Figura 5.14. Arquitectura OPC planteada para el sistema de control del campo de heliostatos

proyecto TSA-SOLAIR. De esta forma quedan también satisfechas las funciones básicas que cualquier sistema SCADA debe cumplir:

- Adquisición de datos, para recoger, procesar y almacenar la información recibida.
- Supervisión, para observar desde un monitor la evolución de las variables de control.
- Control, para modificar la evolución del proceso, actuando bien sobre los reguladores autónomos básicos (consignas, alarmas, menús, etc.) bien directamente sobre el proceso mediante las salidas conectadas.

En una fase posterior se prevé la creación de un servidor OPC-HDA como sistema de adquisición de datos, pudiendo estar localizado dicho servidor en otro ordenador preparado para soportar el manejo de gran cantidad de información.

En esta primera fase se ha implementado el servidor OPC encargado de contactar con todos los HFCC repartidos por el campo de heliostatos. No hay que olvidar que la arquitectura OPC es un modelo Cliente-Servidor donde el Servidor OPC proporciona una interfaz al objeto OPC y lo controla. Por otro lado, una aplicación cliente OPC se comunica con un servidor OPC a través de un cliente OPC específico por medio de una interfaz de automatización. Por tanto el servidor OPC instalado

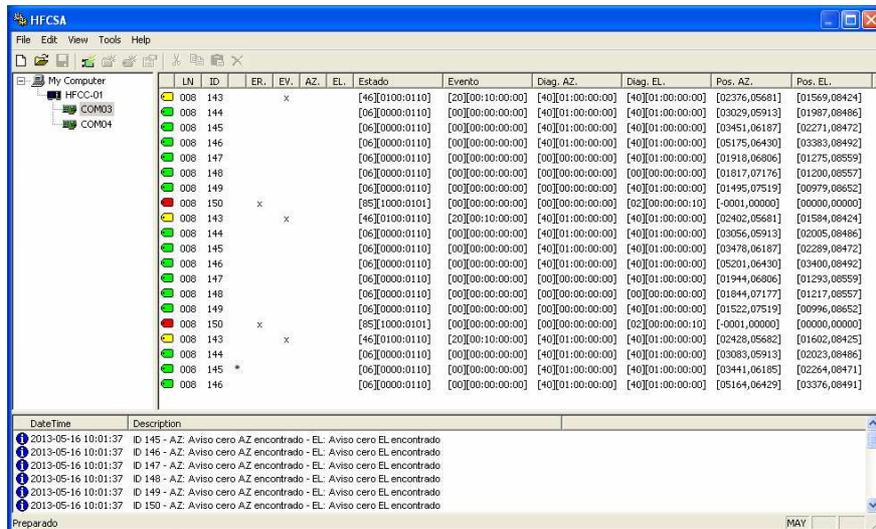


Figura 5.15. Interfaz gráfica para la aplicación básica de operación del HFCS

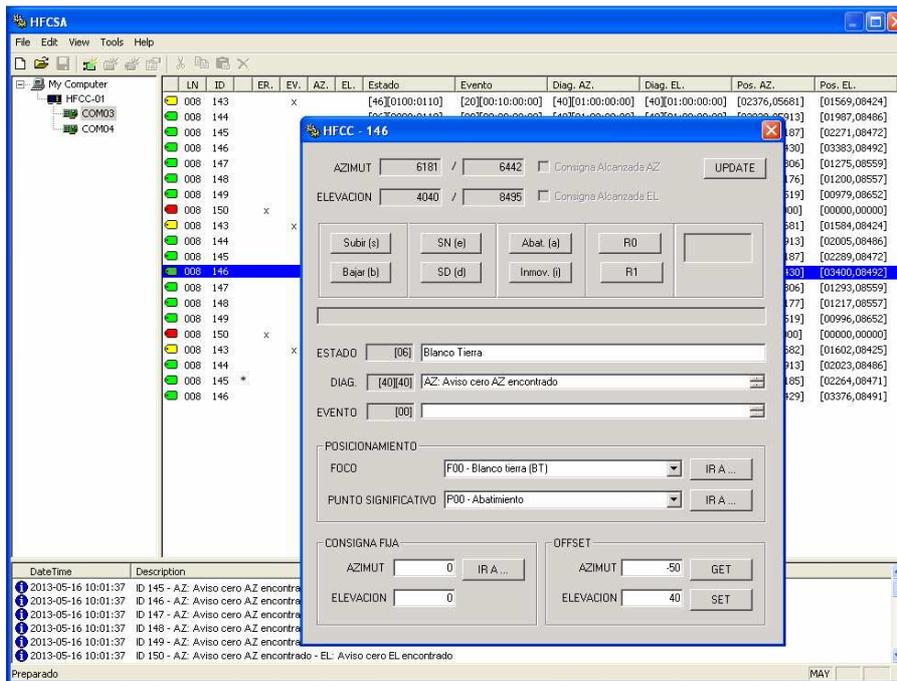


Figura 5.16. Visualización más detallada de la información de un heliostato

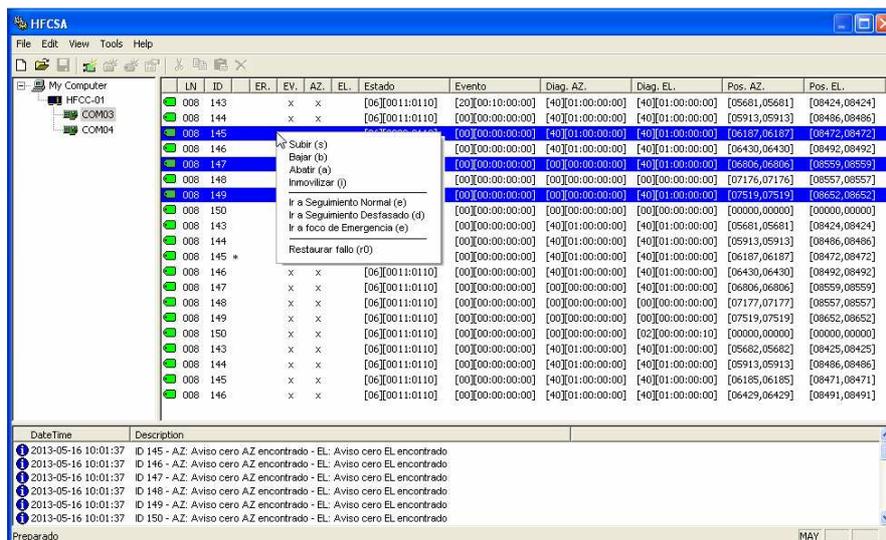


Figura 5.17. Ejecución de comandos básicos de forma colectiva

en la máquina HFCS estará a cargo de controlar todos los HFCC, por lo que ha de tener la posibilidad de ser cliente OPC de todos los servidores OPC de los HFCC. En la figura 5.14 se puede observar esta arquitectura.

Como se puede ver, la gran ventaja de esta arquitectura basada en OPC radica en que una vez creado el servidor OPC para el control del campo de heliostatos, automáticamente queda el sistema preparado para compartir con cualquier otro cliente OPC todas las variables definidas en dicho servidor. Esta gran ventaja nos establecerá las bases para poder integrar el sistema de control del campo de heliostatos en el SCADA del proyecto TSA-SOLAIR.

Aprovechando esta funcionalidad, y bajo petición expresa de los responsables de la instalación, se desarrolla una

aplicación básica de operación del HFCS (HFCSA) cuyo principal objetivo será el de poder comandar de forma fácil el campo de heliostatos independientemente del CRCS (Sistema de Control del Receptor Central). Con ello se persigue que exista una supervisión paralela a cargo de los operadores de la instalación en previsión de que se generen situaciones excepcionales o de emergencia en las que sea necesario evolucionar el campo de heliostatos a una situación segura. En la figura 5.15 se puede observar la pantalla principal de la aplicación HFCSA.

Llegado a este punto, se pretende actuar de la misma forma que se hizo para la implementación de los servidores OPC de nuestro sistema. Se buscan distintas opciones disponibles en el mercado en busca de un Toolkit gratuito en código abierto para la implementación de clientes OPC, pero no se encontró

ninguno publicado bajo la licencia GNU LGPL. Ante tal situación se decide abordar el desarrollo de una Wrapper DLL cuyo objetivo es simplificar al máximo la creación de clientes OPC, todo ello basado íntegramente en la librería SDK (Software Development Kit) para el desarrollo de servidores y clientes nativos de OPC de la OPC Foundation - OPC Core Components 3.00.101 SDK. El resultado de dicha iniciativa es la creación de una librería denominada OPCC v1.0, estando actualmente el autor de este trabajo evaluando la posibilidad de poder publicarla bajo licencia GNU LGPL.

Para la implementación de esta librería se ha optado nuevamente por la utilización de un desarrollo lo más estándar y básico posible, por lo que se ha decidido realizarlo en C++ utilizando el entorno de desarrollo Visual C++ 6.0 de Microsoft. Recordemos que la naturaleza propia de la arquitectura OPC esta basada en el sistema DCOM (Distributed Component Object Model) de Microsoft y que la librería SDK (Software Development Kit) para el desarrollo de servidores y clientes nativos de OPC de la OPC Foundation - OPC Core Components 3.00.101 SDK – está desarrollada en esta misma plataforma.

Al igual que la Wrapper DLL para la creación de servidores OPC, el verdadero potencial de esta Wrapper DLL para la creación de clientes OPC radica en que está desarrollada en el más puro C estándar, siendo fácil de usar y rápido de integrar. El objetivo final de esta librería será la de simplificar al máximo la creación de clientes OPC centrándose única y exclusivamente en la definición y mantenimiento de las variables compartidas por el servidor OPC del que se quiere ser cliente.

Una vez implementada dicha librería se aborda la creación de la HFCSA (Aplicación básica de operación del HFCS). Para su desarrollo se opta por utilizar el entorno de desarrollo Visual C++ 6.0 de Microsoft, basándonos en la MFC (Microsoft Foundation Classes) de Microsoft. La aplicación tiene tres áreas principales, en la parte inferior se recogen los mensajes de interés para la operación del campo. En la parte izquierda se puede ver los HFCC que están operativos en nuestro sistema junto con las líneas que configuran el bus de campo de los helióstatos. En la parte derecha está el listado de todos los helióstatos pertenecientes a una línea particular, junto con la información básica del helióstato.

Como se puede observar en la figura 5.16, esta interfaz permite la ejecución rápida de comandos básicos a nivel individual o colectivo a través de menús contextuales, y también de forma sencilla se puede hacer una consulta más detallada de los parámetros de cualquier helióstato (ver figura 5.17).

V-G. Resultados obtenidos con el HFCS

Dado que el campo de helióstatos está actualmente en la fase de migración de los actuales CLs por otros nuevos basados en Modbus, las pruebas realizadas con el HFCSA para el control de los helióstatos sólo han podido ser realizadas con los helióstatos que ya estuvieran operativos con el nuevo CL. En este caso se tratan de las líneas de comunicaciones 8 y 16, de las cuales no todos los helióstatos tenían el nuevo CL. Para la línea 8 se pudieron comandar 8 helióstatos y de la línea 16 se pudieron utilizar 7 helióstatos. No obstante se quería probar el

funcionamiento del HFCSA con líneas de comunicaciones que tuvieran operativos 20 helióstatos, por lo que se optó por duplicar la presencia de tantos helióstatos operativos hasta completar el total de CLs deseados.

En este caso, y para la comunicación simultánea de las dos líneas de comunicación operativas, se consiguió establecer una ronda básica de comunicaciones de 1,5 s por línea, tiempo inferior del a priori establecido en 2 s.

También se hicieron pruebas de envío de comandos básicos de movimiento y otro conjunto de comandos más complejos a todos los helióstatos operativos, de tal forma que en las primeras pruebas del HFCSA se pudo ajustar satisfactoriamente la hora y fecha local a todos los CLs y se corrigieron los offsets tanto en azimut como en elevación. Estos últimos parámetros del helióstato son fundamentales para el cálculo en cada instante de la posición solar y para conseguir en todo momento una posición correcta del foco del helióstato.

Para la realización del estudio de las comunicaciones con el nuevo sistema HFCSA, se realizaron ensayos con distintas dinámicas y tipos de interrogatorio con el objeto de encontrar una optimización entre el número de fallos y el número de helióstatos interrogados por segundo. Con este estudio se pretende:

- Averiguar la tasa de fallo en diferentes condiciones de operación
- Averiguar el número máximo de helióstatos interrogados por segundo
- Probar y ensayar distintos tipos de interrogatorios
- Probar distintas configuraciones Modbus en busca de la más apropiada.

Con el nuevo sistema HFCSA se podrá averiguar en todo momento el máximo tráfico posible, detectando y registrando los conflictos y las colisiones que se puedan presentar.

El tipo de interrogatorio utilizado para este ensayo será del tipo pregunta/respuesta. Se pregunta al helióstato y se espera contestación. Si no hay respuesta se agota el tiempo máximo permitido, timeout, y se pregunta al siguiente. Si hay contestación, al final de la misma se espera un tiempo antes de preguntar al siguiente helióstato (tiempo de espera entre peticiones). Este tipo de interrogatorio tiene, por tanto, dos variables de control de tiempo: timeout y tiempo de espera. No obstante tras varios ensayos preliminares se opta por fijar el timeout al tiempo de espera más un intervalo fijo de 25 ms, ya que se comprueba que este intervalo de tiempo es suficiente para no saturar la línea de comunicaciones.

Una vez fijado el tipo de interrogatorio utilizado, ahora se procede a fijar los niveles de interrogatorio:

Nivel 0: Corresponde con el nivel básico de interrogatorio suministrado por el servidor OPC-DA compacto, recabando sólo la información básica de los distintos helióstatos.

Nivel 1: Corresponde con un acceso a los parámetros de los helióstatos que no sea su información básica, por lo que será necesario acceder el servidor OPC-DA extendido.

Ensayo	Nivel	Tiempo	Peticiones fallidas (sobre un total de 1000)								% Fallos
			143	144	145	146	147	148	149	150	
20130723a	0	25+25	40	40	20	20	60	30	50	10	3,38
20130723b	0	50+25	20	30	20	10	20	10	20	0	1,63
20130723c	0	75+25	40	20	00	10	60	0	10	20	2
Totales			100	90	40	40	140	40	80	30	2,33
20130723a	1	25+25	30	40	0	10	40	30	20	40	2,63
20130723b	1	50+25	40	30	10	10	20	30	0	10	1,88
20130723c	1	75+25	30	80	0	10	10	20	50	0	1,50
Totales			100	150	10	30	70	80	70	50	2,33
20130724a	0	25+25	0	60	0	20	10	00	50	0	1,75
20130724b	0	50+25	0	30	0	00	0	10	30	10	1
20130724c	0	75+25	0	10	10	10	10	10	30	0	1
Totales			0	100	10	30	20	20	110	10	1,25
20130724a	1	25+25	30	40	0	120	20	10	10	20	3,13
20130724b	1	50+25	0	10	0	0	30	20	10	10	1
20130724c	1	75+25	50	0	0	30	60	10	70	30	3,13
Totales			80	50	00	150	110	40	90	60	2,42
20130725a	0	25+25	20	40	0	30	10	0	10	10	1,50
20130725b	0	50+25	0	0	0	0	20	20	0	20	0,75
20130725c	0	75+25	30	10	0	0	0	20	30	30	1,50
Totales			50	50	0	30	30	40	40	60	1,25
20130725a	1	25+25	30	0	0	30	0	40	10	0	1,38
20130725b	1	50+25	20	10	0	10	0	0	40	20	1,25
20130725c	1	75+25	20	20	0	10	10	20	0	10	1,13
Totales			70	30	0	50	10	60	50	30	1,25

Tabla 5.18. Porcentaje de fallos en el envío y recepción de comandos a los helióstatos

Para asegurar los datos obtenidos se han repetido los ensayos al menos tres veces, lo que hace un total de 18 ensayos realizados por día en tres días diferentes (3 tipos de interrogatorio, 2 niveles de interrogatorio y por 3 repeticiones). En la tabla 5.18 se reflejan los datos obtenidos en los ensayos realizados.

Todos los ensayos son realizados con la misma velocidad de 19200 baudios en la línea RS485, siendo esta configurable en el control local del helióstato. La línea de comunicaciones utilizada corresponde a la línea 8 del campo de helióstatos del CESA-1 y los helióstatos utilizados van del id de Modbus 143 al id 150, 8 en total.

Analizando los resultados obtenidos (ver figura 5.19) se observa que el número de fallos obtenido, considerado como tal el haber alcanzado el tiempo de timeout en una petición realizada a un helióstato sin haber obtenido respuesta por parte de éste, es inferior para un intervalo de tiempo de 75 ms (timeout de 50 ms y tiempo de espera de 25 ms). Este tiempo es el necesario para que una petición sea enviada al helióstato, este la procese y devuelva la respuesta correspondiente. Y como era de esperar, así mismo se observa un mejor rendimiento en respuesta para el servidor OPC-DA compacto ya que éste sólo realiza un interrogatorio a nivel básico muy específico.

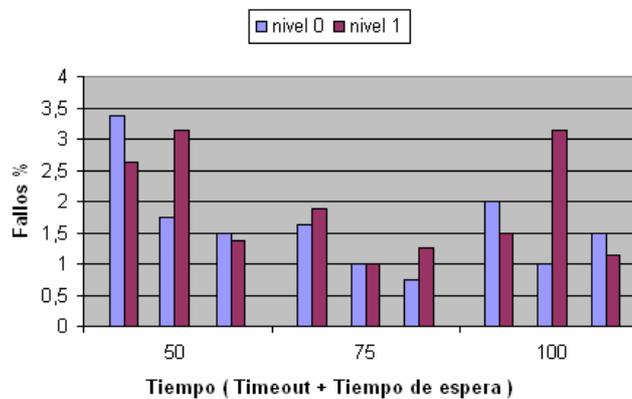


Figura 5.19. Porcentaje de fallos en función del intervalo de tiempo de espera entre peticiones

VI. SISTEMA DE CONTROL DEL RECEPTOR CENTRAL (CRCS)

Una vez implementado el HFCS (Sistema de Control del Campo de Helióstatos), se aborda el desarrollo del CRCS, con la premisa de ser un sistema que ha de estar preparado para su integración en el actual sistema de control del proyecto TSA-SOLAIR. El objetivo principal del CRCS será el de regular la temperatura del vapor generado en el intercambiador de calor, para lo cual el CRCS establecerá las consignas necesarias en los elementos del receptor solar y de su etapa de potencia mediante la ejecución de lazos de control.

Se hace por tanto necesario el desarrollo de una interfaz integrada dentro del SCADA del sistema TSA-SOLAIR que nos proporcione la posibilidad de poder ejecutar algoritmos de control (lazos de control) desarrollados por los especialistas en ingeniería de control. Para tal fin se tendrá que establecer un protocolo de comunicación entre el SCADA y el lazo de control, se tendrá que establecer la política de intercambio de parámetros entre ambos, se tendrá que dar la posibilidad de que los ingenieros de control puedan utilizar las herramientas más comunes para la implementación de estos algoritmos de control y por último se tendrá que dotar al sistema SCADA de los mecanismos de carga y configuración para la ejecución de los lazos de control.

Cumplido tal objetivo tendríamos por fin cubiertas las necesidades de comunicación entre los dos subsistemas principales que forman el sistema TSA-SOLAIR, a saber el Sistema de Control de Campos de Helióstatos (HFCS) y el Sistema de Control del Receptor Central (CRCS), de tal forma que ya se podría desarrollar cualquier estrategia de control en el sistema de forma fácil y segura.

VI-A. Requisitos básicos de implementación del CRCS

Tras varias reuniones con los responsables de la instalación se establecen los siguientes requisitos básicos que ha de satisfacer el sistema de control del campo del receptor central con objeto de establecer una primera versión operativa del mismo.

- No se considera necesario desarrollar un SCADA completamente nuevo para la implementación del nuevo CRCS, se considera más que oportuno utilizar toda la funcionalidad del actual SCADA y sólo realizar las modificaciones necesarias para poder ejecutar los nuevos lazos de control.
- Se desea que el CRCS se ejecute en un control central distinto al del SCADA del TSA-SOLAIR, para conseguir de esta forma utilizar toda su potencia de cálculo en la ejecución de los algoritmos de control del sistema. Como consecuencia el SCADA del TSA-SOLAIR quedará encargado de la supervisión del CRCS y por extensión deberá de suministrar todas las variables de proceso necesarias para la ejecución de los lazos de control, ya que precisamente en este control central están instaladas todas las tarjetas de adquisición del sistema. Como nota recordatoria sirva indicar que en realidad el sistema de control del TSA-SOLAIR está descentralizado en 3 PCs llamados PC1, PC2 y DAS.

- La aplicación que controla el CRCS ha de quedar abierta a futuras modificaciones y mejoras, así como dispuesta para poder ejecutar varios lazos de control en paralelo. La conveniencia de utilización de un lazo de control u otro queda bajo la supervisión del responsable del ensayo que a priori establecerá que criterios de operación serán necesarios y establecerá que lazos de control serán ejecutados para conseguir los objetivos marcados.
- Las variables principales de estado del CRCS será el mapa de temperaturas en el receptor central y/o el caudal del fluido en la etapa de potencia. Indistintamente se usará las que sean necesarias en función del tipo del lazo de control que se decida ejecutar. Estas variables principales constituirán la información de retorno con el que se alimentará en lazo cerrado los algoritmos de control.
- Como ya es sabido, se desea tener control total sobre el campo de helióstatos. A tal efecto se establecen como variables principales de estado del HFCS (Sistema de Control del Campo de Helióstatos) la matriz de estado del campo, o matriz de focos del receptor central, que no es otra que la matriz formada por el conjunto de helióstatos que están apuntando a los distintos focos del receptor central.
- La evolución del campo de helióstatos se basará en el tratamiento de la matriz de estado del campo. Esto supone que para poder calcular la nueva matriz de estado del campo es necesario saber que helióstatos deberán de apuntar o dejar de apuntar a un determinado foco. Para ello se hace necesario caracterizar el campo de helióstatos, que no es otra cosa que parametrizar las características y potencias de los distintos helióstatos.
- Se tendrá que dar la posibilidad a que los ingenieros de control puedan utilizar las herramientas más comunes para la implementación de estos algoritmos de control, sugiriéndose especialmente la integración de controles desarrollados en MATLAB (MATrix LABoratory) dado que es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo.
- Se debe de llevar a cabo una política de detección y gestión de alarmas y errores para supervisar el correcto funcionamiento de los distintos lazos de control en ejecución.
- Se tendrá que dotar al sistema CRCS de los mecanismos de carga y configuración para la ejecución de los distintos lazos de control, de tal forma que sea fácil y rápido.

VI-B. Diseño del CRCS

Dadas las especificaciones y las necesidades planteadas, se determino adecuada la alternativa hardware mostrada en la figura 6.1. Esta arquitectura es consecuencia de la implantación de un sistema distribuido ante el requerimiento funcional deseado de que el CRCS se ejecutara en otro PC distinto al del SCADA del TSA-SOLAIR.

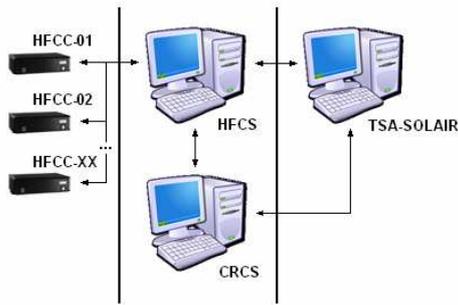


Figura 6.1. Arquitectura hardware planteada para el sistema de control del sistema TSA-SOLAIR

La primera consecuencia directa es que todos los controles centrales estarán conectados a través de una red Ethernet Industrial, de tal forma que se garantice una comunicación rápida y segura entre todos los subsistemas principales que forman el sistema TSA-SOLAIR.

Cada vez más crece la aceptación que Ethernet tiene en el campo industrial. Esto es debido fundamentalmente a las ventajas que aporta cuando es instalado en la industria (rapidez, simple ampliación y apertura y costes de instalación y configuración muy bajos entre otras), a la forma de interconectarlo y a las posibilidades de diagnosticar su funcionamiento. Además otra característica importante que presenta es que permite la comunicación por protocolo TCP/IP con otros equipos ajenos.

Actualmente las redes industriales basadas en Ethernet aún no dominan el mercado de la comunicación industrial ya que tienen algunas deficiencias como es que los segmentos de cable se limitan a 100 metros, necesita concentradores, y los concentradores requieren un puerto cada uno para poder conectarse. Por otra parte Ethernet provee a los sistemas de control de más ancho de banda y puede tener redundancia de medio físico. Se puede decir que las principales razones de su uso son las siguientes:

1) *Interoperabilidad*, que es la posibilidad de conectar dos dispositivos a través del mismo medio sin conflictos. Los dispositivos deben poder abordar el mismo medio físico. Esto da a las soluciones basadas en Ethernet la posibilidad de que varios protocolos puedan convivir entre ellos, utilizando si es necesario el mismo medio físico que se usa para conectar los PCs de las oficinas, las cámaras de vigilancia, e incluso las impresoras de red.

2) *Plug & Play*. Mediante este sistema se facilita el trabajo al usuario y se reducen costes en el mantenimiento o instalaciones tediosas y largas. Esto se traduce en un sistema que minimice o incluso no necesite un manual de configuración o parametrización. La conectividad de Ethernet, y la facilidad de los equipos que utilizan esta tecnología, se encuentra al alcance de todos los usuarios, pudiendo realizar cualquier trabajador las labores de instalación y configuración mediante software de manera rápida y fácil.

3) *Robustez*. Una caída de la red industrial puede ser extremadamente dañina a los servicios de control, así Ethernet

está preparada para estos fallos. Ethernet suele utilizar varios niveles de redundancia que refuerzan las comunicaciones de los componentes. Adicionalmente a esta redundancia de cableado, Ethernet dispone de mecanismos que se utilizan para encontrar rutas alternativas a la comunicación cuando se produce un fallo en un posible camino. A nivel físico, la fibra óptica utilizada en Ethernet puede utilizarse en varias áreas donde se necesiten cubrir grandes distancias e incluso en zonas donde la interferencia electromagnética sea muy elevada. Los conectores creados para Industrial Ethernet soportan golpes, vibraciones y temperaturas extremas. El cableado por último también está más que preparado, ya que el par trenzado empleado posee una buena relación S/N (señal/ruido) y realiza un filtrado del ruido a altas frecuencias de transmisión.

4) *Software Ethernet*. No se requiere instrumentación o software específico, para el control y gestión de la red pueden utilizarse todas las herramientas que existen actualmente. Existen varias herramientas muy útiles basadas en IP como el Ping que ayuda a ver si una de las estaciones ha caído, que pueden utilizarse en cualquier sistema basado en Ethernet con TCP/IP.

5) *OPC (OLE for Process Control)*. Como ya es sabido se trata de un estándar de comunicación en el campo de control y supervisión de procesos. Permite que diferentes fuentes de datos envíen datos a un mismo servidor OPC, al que a su vez podrán conectarse diferentes programas compatibles con dicho estándar. De este modo se elimina la necesidad de que todos los programas cuenten con drivers para dialogar con múltiples fuentes de datos, basta que tengan un driver OPC.

6) *Control y mantenimiento remoto*. A través de Ethernet y gracias a la tecnología IP, los controladores de un proceso pueden estar dotados de mecanismos de acceso remoto que a su vez tendrían acceso a los datos del proceso. Así, podríamos fácilmente por ejemplo comprobar el estado de cientos de sensores y hasta podríamos configurarlos remotamente.

Una vez fijado el medio físico de transporte, ahora se tiene que fijar el protocolo de comunicaciones que utilizará el sistema CRCS. Y como era de prever para este caso se optará por utilizar OPC, de esta forma se garantiza la integración total del CRCS en el sistema TSA-SOLAIR. Para un mayor detalle de los motivos de elección de dicho protocolo de comunicaciones se pueden consultar los puntos V-C, V-D y V-E de este mismo trabajo.

Ahora sólo nos queda determinar el entorno de desarrollo que se utilizará para implementar el CRCS, y nuevamente como era de prever se eligió LabVIEW para compatibilizarla con el ya existente SCADA del sistema de control de TSA-SOLAIR. Para un mayor detalle sobre el desarrollo de SCADAs basados en LabVIEW se pueden consultar el punto II-I de este mismo trabajo. De entre todas las características a destacar, es digno de mención que LabVIEW puede compartir datos a través de ActiveX, la Web, DLLs, librerías compartidas, SQL, TCP/IP, XML, OPC y otros. Así mismo además, LabVIEW permite la ejecución de código MATLAB

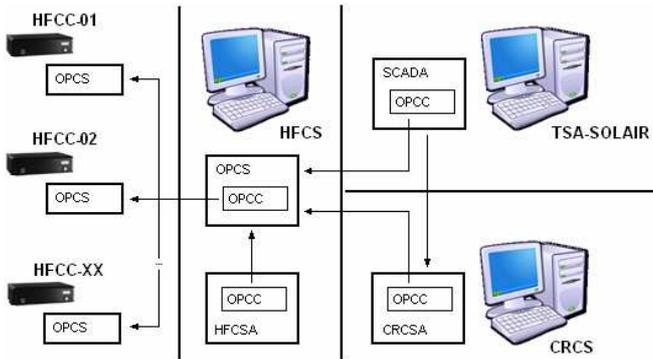


Figura 6.2. Arquitectura OPC planteada para el sistema de control del sistema TSA-SOLAIR

aplicación que permita conectar directamente con los sistemas TSA-SOLAIR (aplicación LabVIEW) y HFCC (servidor OPC).

Otra de las grandes ventajas que nos ofrece DSC es la posibilidad de facilitar el registro de datos a la base de datos histórica, integrada y en red, o el registro a su base de datos relacional. Se podrá así mismo establecer el registro de alarmas y la notificación de eventos, siendo esta característica otro punto importante a tener en cuenta.

En una primera fase se ha desarrollado una aplicación CRCSA básica en la que ya quedan fijadas las bases de los mecanismos de comunicación que se utilizarán entre los distintos subsistemas de TSA-SOLAIR. Como era de esperar todos estos están basados en la utilización de clientes OPC, y en particular para el SCADA de TSA-SOLAIR y para el CRCSA se hará a través del módulo DSC de LabVIEW. En la figura 6.2 se puede observar esta arquitectura.

Para la implementación inicial de los distintos lazos de control se ha optado por utilizar un desarrollo lo más estándar y básico posible, por lo se decidió realizarlos en C estándar utilizando el entorno de desarrollo Visual C++ 6.0 de Microsoft, mediante la creación de una Librería de Enlace Dinámica (DLL). Acto seguido se implementó un mecanismo lo más genérico posible para la ejecución de los lazos de control desde LabVIEW, con el objetivo de dejar las puertas abiertas a la posibilidad de que se pudieran crear controles utilizando distintas herramientas de desarrollo. A tal efecto se creó un Wrapper DLL denominado vc.api.dll para la automatización a la hora de cargar y ejecutar cualquier lazo de control. Se pretendió desde el principio que el proceso de automatización fuera lo más sencillo posible, por lo optó por basarlo en la única ejecución de tres funciones:

- vc_new(). Es la función que se encarga de la carga dinámica de la librería DLL que implementa el lazo de control a ejecutar, así como de la inicialización de las distintas variables de entorno necesarias para su ejecución.
- vc_step(). Es la función que se encarga de la ejecución paso a paso del lazo de control, como parámetros principales tiene el array de las variables de entrada y el array de las variables de salida. Cada vez que se invoque a esta función se realizarán los cálculos necesarios teniendo como base los valores contenidos en estos dos arrays y los nuevos valores se volcarán en el array de las variables de salida.

de forma integrada en sus aplicaciones, aportándole la potencia matemática necesaria para implementar algoritmos de control complejos, dando lugar a un lenguaje de programación muy completo para el desarrollado integro de sistemas tipo SCADA.

Por último se establece el procedimiento a seguir para que el CRCS controle de forma automática el sistema TSA-SOLAIR. Por un lado el SCADA del TSA-SOLAIR podrá operar el sistema en lazo abierto con tan sólo la ausencia de ejecución de cualquier lazo de control en CRCS o podrá hacerlo en lazo cerrado mediante la ejecución de uno o varios lazos de control.

Para poder gobernar el campo de heliostatos, el lazo de control del CRCS recibirá la matriz de estado del campo (matriz de focos) proveniente del SCADA del TSA-SOLAIR, calculará la nueva matriz (estableciendo que heliostatos apuntarán a los distintos focos del receptor central) y la devolverá al SCADA para que se envíen las ordenes oportunas al HFCS. Estas variables principales constituyen la información mínima del estado del campo de heliostatos y por tanto será la información de retorno con el que se alimentará en lazo cerrado el algoritmo de control.

VI-C. Implementación del CRCS

Como se ha comentado anteriormente, para mantener la compatibilidad con el SCADA de sistema TSA-SOLAIR se utilizará LabVIEW de National Instruments para el desarrollo de la Aplicación del CRCS (CRCSA). Esta opción nos permitirá utilizar el módulo denominado NI LabVIEW Datalogging and Supervisory Control Module (DSC), con objeto de poder integrar fácilmente un cliente OPC en la

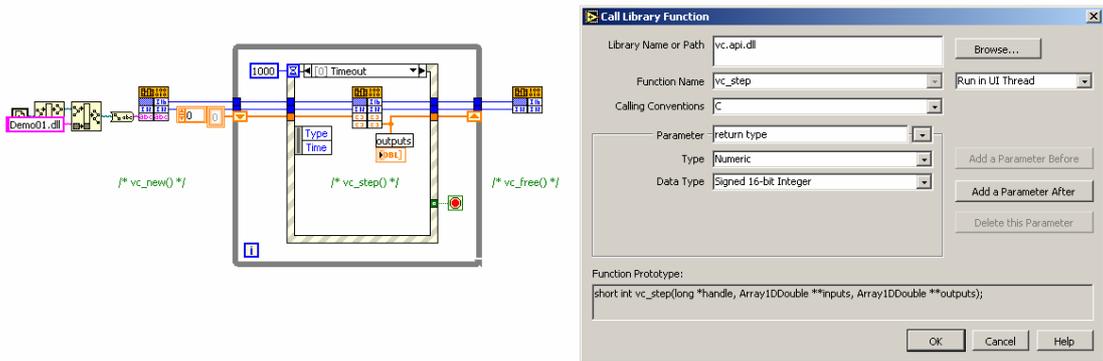


Figura 6.3. Ejemplo básico de la ejecución de un lazo de control basado en C estándar

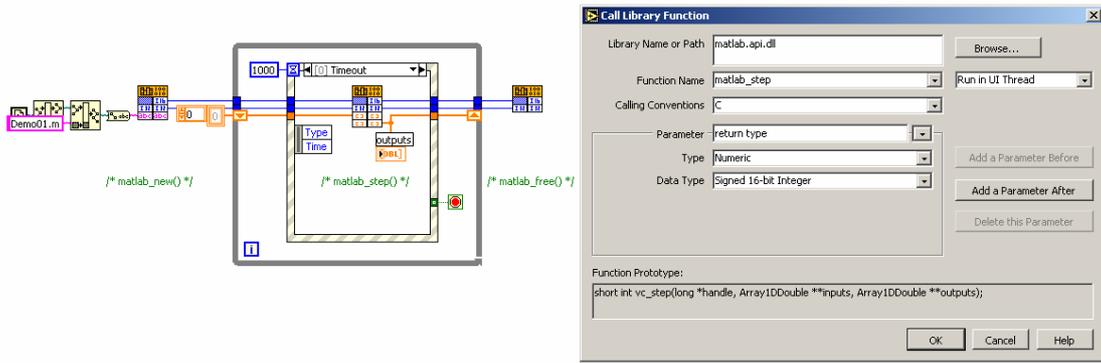


Figura 6.4. Ejemplo básico de la ejecución de un lazo de control basado en MATLAB

- `vc_free()`. Es la función que se encarga de liberar la librería DLL y de cualquier tipo de recurso utilizado en el proceso.

Un ejemplo básico de utilización de la Wrapper DLL se puede observar en la figura 6.3. Esta filosofía de trabajo tan fácil de utilizar nos aporta la gran ventaja de tener el sistema preparado para la inclusión de cualquier otro Wrapper DLL que nos proporcionará la posibilidad de poder utilizar cualquier lazo de control desarrollado con otras herramientas de desarrollo. Para el caso particular de MATLAB se podría haber utilizado los mecanismos propios que LabVIEW posee para la integración de código MATLAB dentro de sus aplicaciones, pero sin embargo se prefirió crear otra Wrapper DLL que nos facilitara la posibilidad de ejecutar cualquier archivo M creado por MATLAB siguiendo el mismo procedimiento expuesto

anteriormente.

Para tal efecto se creó la librería `matlab.api.dll` siguiendo el mismo procedimiento anteriormente descrito, por lo que análogamente se implementaron las funciones `matlab_new()`, `matlab_step()` y `matlab_free()`. En la figura 6.4 se puede observar un ejemplo básico de utilización de esta librería. La dificultad en este caso particular radicaba en la procedimiento a utilizar para ejecutar los archivos M de MATLAB. En este sentido fue necesario el desarrollo de una serie de interfaces para poder establecer comunicación con el espacio de trabajo de Matlab a través de S-funcions utilizando las C MEX-Funcions de las Matlab APIs. A continuación fue necesario comunicar el espacio de trabajo de Matlab con el código interno de la Wrapper DLL, por lo que se utilizaron las librerías Engine del Matlab API.

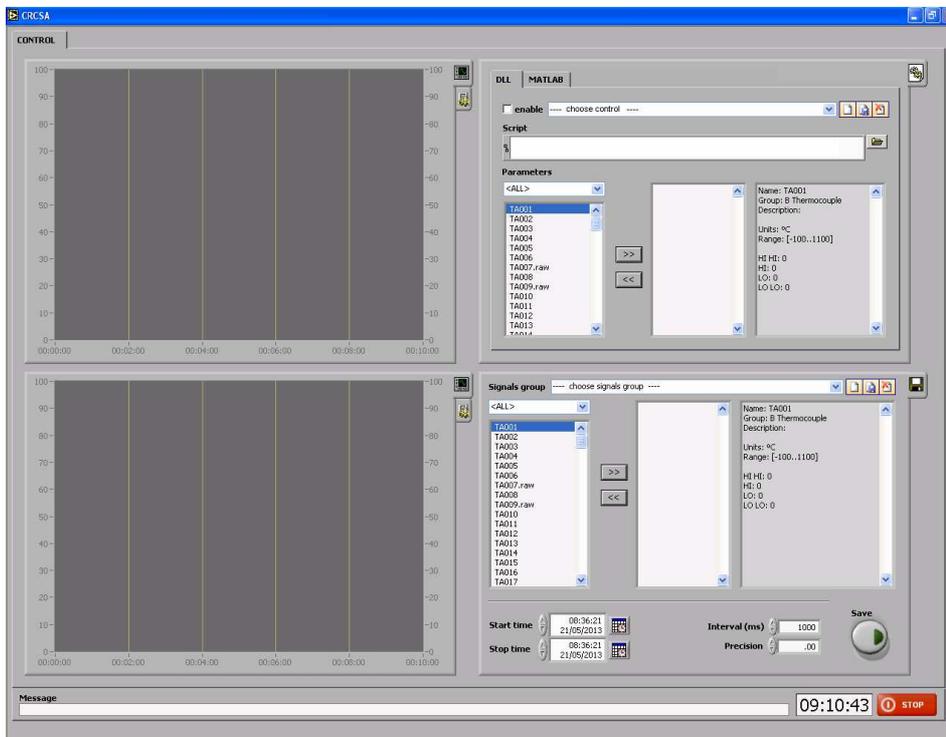


Figura 6.5. Pantalla principal de la aplicación de control del CRCS

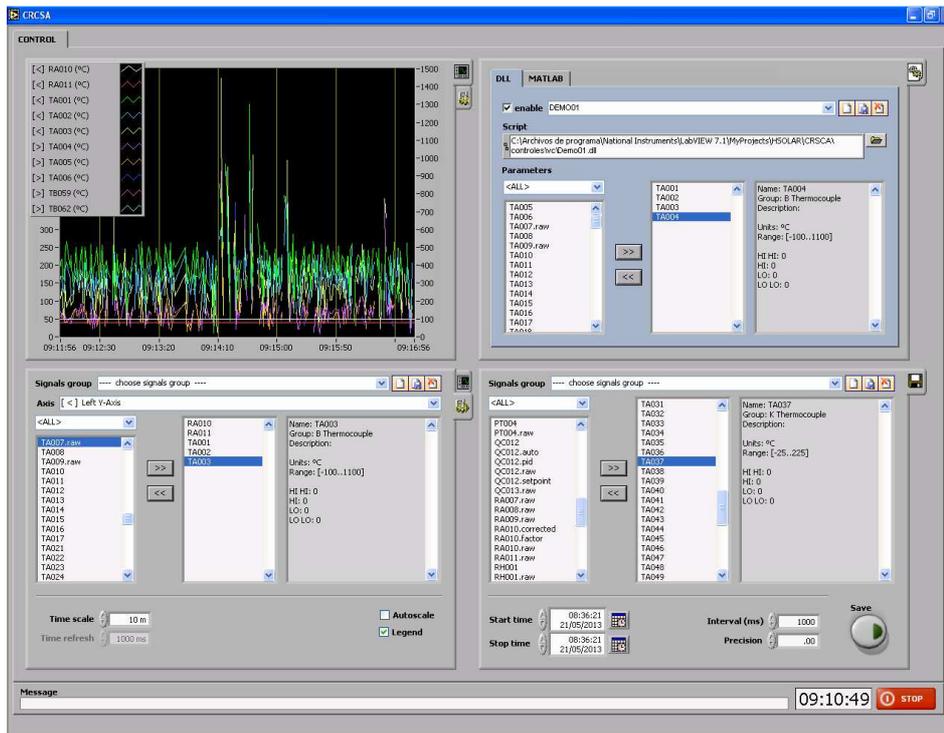


Figura 6.6. Ejecución de un lazo de control basado en C estándar

Una vez determinada la forma en la que el CRCS podrá ejecutar dinámicamente los lazos de control, se pasó a desarrollar una versión básica del CRCS para la ejecución de cualquier lazo de control desarrollado con C estándar o MATLAB. Ver figura 6.5.

Esta aplicación sólo posee una pantalla principal en la que se podrán realizar todas las acciones necesarias para la ejecución de los lazos de control. Concretamente en la parte superior derecha está la parte correspondiente a la carga y configuración de los lazos de control. El procedimiento básico consiste en la selección del archivo y la definición del conjunto de variables necesarias que se le pasarán como parámetro para que pueda realizar las distintas operaciones que se hayan implementado en el control.

En la parte de la izquierda se han insertado dos gráficas de tendencias, con el objetivo de habilitar la posibilidad de poder ir visualizando en tiempo de ejecución todas las variables de proceso que se deseen. Para simplificar el manejo de dichas visualizaciones también se ha implementado un procedimiento básico para la creación y mantenimiento de distintos grupos de variables.

Por último en la parte inferior derecha se ha habilitado un procedimiento básico de consulta y extracción de los datos históricos de todas las variables de proceso utilizadas en la ejecución de los distintos lazos de control. Por unificación de criterio con el resto de las pestañas de la aplicación, también se ha habilitado el mismo procedimiento para la creación y mantenimiento de distintos grupos de variables.

Dado que actualmente el campo de helióstatos y el receptor central están en una fase de remodelación, nos encontramos con la limitación de no poder operar el sistema TSA-SOLAIR de una forma completa, por lo que se opta en una primera

aproximación por la creación de un lazo de control que únicamente controlará los 6 helióstatos de una línea 8 de comunicaciones del campo de helióstatos (ver figura 6.7). Por otro lado, y dado que el objetivo de este proyecto no es crear un control sofisticado sino el de suministrar las herramientas necesarias para poder ejecutar lazos de control desde nuestro sistema, optamos por crear un control lo más básico posible cuyo objetivo será única y exclusivamente ir enfocando helióstatos en el centro del receptor solar para ir observando como evoluciona la temperatura. El resultado de la ejecución de dicho control se puede observar en la figura 6.6, en la que se puede ver con más detalle como configurar los distintos grupos de variables relacionados con las distintas partes de la aplicación.



Figura 6.7. Helióstatos con los nuevos controles locales basados en Modbus correspondientes a la línea 8 de comunicaciones del campo CESA-1

VI-D. Diagrama de bloques del CRCS

La aplicación labVIEW se ha diseñado de tal forma que las principales funciones que tiene que realizar se corresponden con la ejecución de procesos independientes, o dicho en otras palabras, la aplicación está integrada mediante la implementación de un conjunto de SubVi independientes que son cargados dinámicamente. La ejecución de estos procesos (SubVi) está gestionada por el proceso principal de la aplicación CRSS, encargado de la ejecución y sincronización del resto de procesos que componen la aplicación. Esta división de la funcionalidad en pequeñas tareas tiene como objetivo

poder depurar fácilmente el código y poder reutilizarlas en el desarrollo de otros sistemas SCADA. No obstante, los distintos procesos siempre van a depender unos de otros en algún aspecto, puesto que comparten datos y variables de sincronización para mantener una ejecución coordinada entre todos ellos. En la figura 6.8 se muestra el árbol jerárquico de funciones de la aplicación, donde se pueden ver los principales procesos implementados y las dependencias que mantienen entre ellos, describiendo brevemente la función de cada uno en la tabla 6.9.

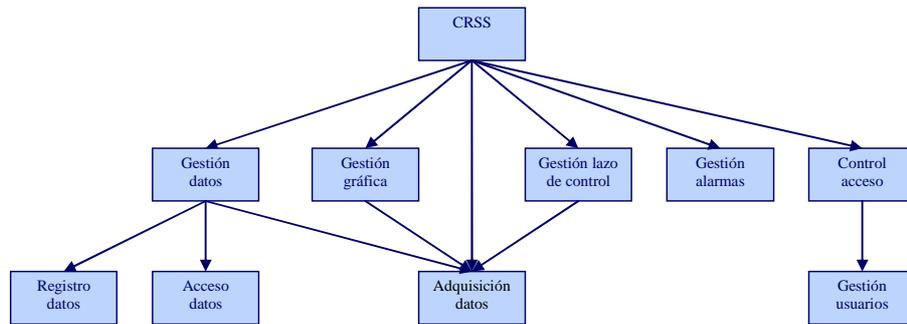


Figura 6.8. Árbol jerárquico de los módulos implementados en la aplicación CRSS

Nombre	Descripción
CRSS	Es el proceso principal de nuestra aplicación. Se encarga de sincronizar la ejecución del resto de procesos que la integran, y también se encarga de mostrar y gestionar la pantalla principal de la interfaz de usuario.
Gestión datos	Permite la gestión (alta, baja, consulta o modificación) y la configuración de las distintas variables que se utilizarán en la aplicación
Registro datos	Se encarga del registro de las distintas variables de proceso utilizadas
Acceso datos	Procedimiento básico de consulta y extracción de los datos históricos de todas las variables de proceso utilizadas en la ejecución de los distintos lazos de control.
Gestión gráfica	Es módulo encargado de gestionar las gráficas de tendencias, con el objetivo de habilitar la posibilidad de poder ir visualizando en tiempo de ejecución todas las variables de proceso que se deseen
Gestión lazos de control	Permite la carga y configuración de los lazos de control. El procedimiento básico consiste en la selección del archivo y la definición del conjunto de variables necesarias que se le pasarán como parámetro para que pueda realizar las distintas operaciones que se hayan implementado en el control.
Gestión alarmas	Comprueba la presencia de algún tipo de alarma en el funcionamiento de cada sensor, en caso afirmativo registra dicho evento, mostrándolo también por pantalla. Para comprobar que los datos leídos por el módulo de adquisición se encuentren dentro de los límites de funcionamiento establecidos para cada sensor, se genera un valor asociado que determina el estado del sensor.
Control acceso	Gestiona el acceso a la aplicación por parte de los usuarios, registrando su acceso.
Gestión usuarios	Permite gestionar los usuarios de la aplicación, incluyendo perfiles para controlar el acceso de los usuarios a las distintas partes de la aplicación.
Adquisición datos	Este módulo es el encargado de centralizar la adquisición de datos para suministrar sus valores al resto de los módulos de toda la aplicación. Se encargará de acceder vía OPC a todos los servidores OPC del sistema para leer y/o escribir sobre todas las variables de proceso utilizadas, dando especial prioridad a aquellas variables de proceso asociadas a los lazos de control que se puedan estar ejecutando. De esta forma se prioriza la adquisición de datos hacia los lazos de control, dejando al resto de variables con una prioridad inferior para que no interfiera con el correcto funcionamiento de los lazos de control.

Tabla 6.9. Descripción e los procesos más importantes de la aplicación CRSS



Figura 6.10. SCADA del proyecto TSA-SOLAIR en la sala de control de CESA-1



Figura 6.11. Detalle instantáneo de la evolución del ensayo

VI-E. Resultados obtenidos con el CRCS

Como ya se comentó en el anterior apartado sólo se podrán utilizar 6 helióstatos para nuestro ensayo, ya que el campo de helióstatos y el receptor central están en una fase de remodelación. No obstante este hecho no supondrá limitación funcional en nuestro sistema, ya que se podrá observar claramente como evoluciona la temperatura del receptor central con el progresivo enfoque y desenfoque de helióstatos.

El ensayo realizado consistirá en la ejecución de un lazo de control mediante el cual cada 10 minutos se irán enfocando 3 helióstatos al receptor central y una vez enfocados los 6 helióstatos se irán desenfoqueando de 3 en 3 cada 10 minutos y se observará como va evolucionando la temperatura en el receptor. El hecho de utilizar un lapso de tiempo tan largo se corresponde a la gran inercia que posee el receptor a la hora de variar su temperatura. Para asegurar los datos obtenidos se ha repetido el ensayo en tres días distintos, concretamente el 7, 8 y 9 de agosto del 2013. En las figuras 6.10 y 6.11 se puede observar la sala de control dónde se realizaron los ensayos y una instantánea global de la evolución del ensayo.

Como paso previo al ensayo fue necesario corregir los offsets de los helióstatos en sus valores de azimut y elevación. Estos parámetros del helióstato son fundamentales para el cálculo en cada instante de la posición solar y para conseguir en todo momento una posición correcta del foco del helióstato. En nuestro caso han de ser tales que el blanco del helióstato debe de estar situado exactamente en el centro del receptor solar. Esta corrección se realizó a medio día solar, con objeto de obtener un foco lo más homogéneo posible, y se hizo a través del nuevo sistema de control del campo de helióstatos (HFCS), para mayor información el lector puede consultar el apartado V de este trabajo.

Al inicio del ensayo son enviados todos los helióstatos a seguimiento desfasado a través de su pasillo de seguridad, paso previo a la orden de enfoque (ver figura 6.12). Una vez que todos los helióstatos han alcanzado la posición de seguimiento desfasado se procede a lanzar la ejecución del lazo de control implementado. Este procedimiento sirve también para establecer el tiempo de respuesta de los helióstatos ante el envío de comandos desde el sistema de control del receptor central. En la figura 6.13 se observa el receptor central del TSA-SOLAIR durante los ensayos de evaluación del sistema.



Figura 6.12. Helióstatos de la línea 8 de comunicaciones en posición de seguimiento desfasado

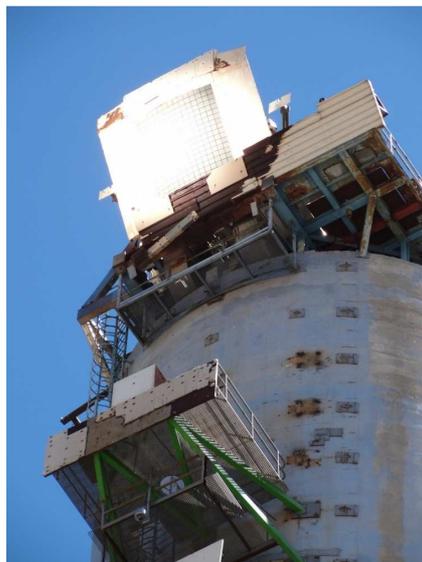


Figura 6.13. Receptor central de TSA-SOLAIR con los 6 helióstatos de la línea 8 de comunicaciones apuntado a su centro.

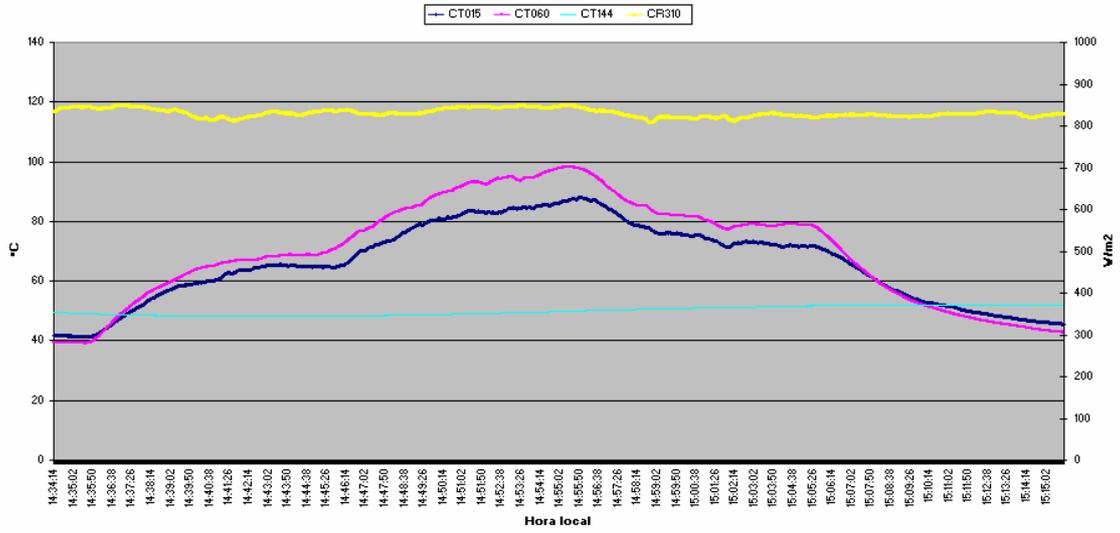


Figura 6.14. Características del receptor en el ensayo del día 07/08/2013

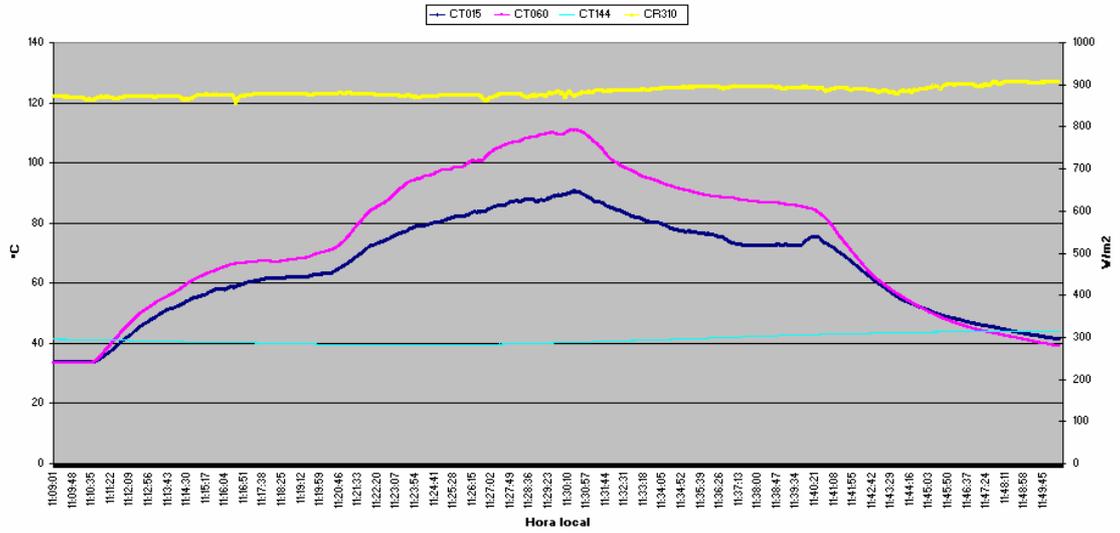


Figura 6.15. Características del receptor en el ensayo del día 08/08/2013

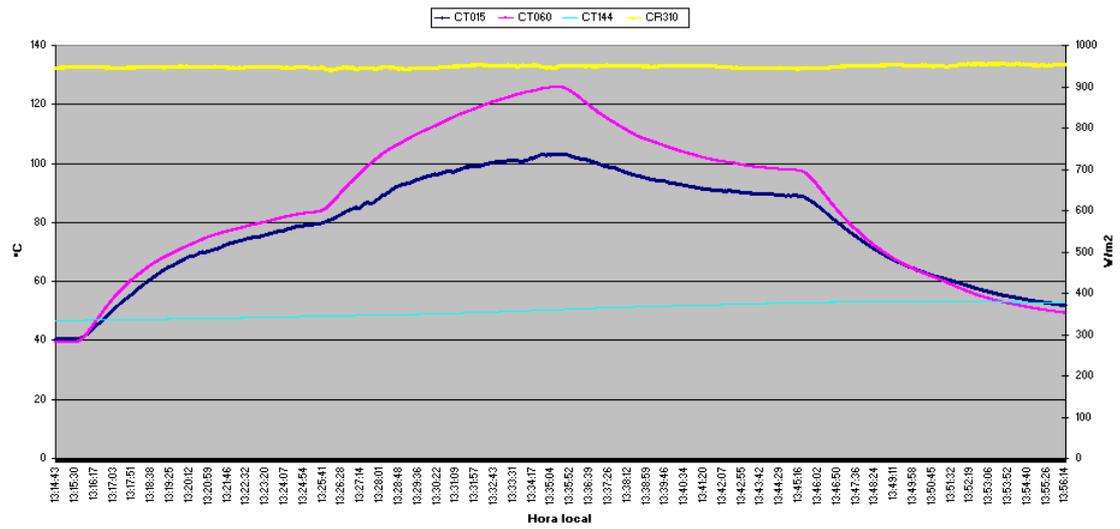


Figura 6.16. Características del receptor en el ensayo del día 09/08/2013

En las figuras 6.14, 6.15 y 6.16 se muestra el resultado de la ejecución del lazo de control en los 3 días de ensayo. Las variables principales que se han utilizado para caracterizar al receptor son:

- CT015: Temperatura media del aire de salida del receptor, se calcula con las temperaturas del aire caliente en el tubo del embudo del receptor (°C).
- CT060: Temperatura media del aire en el absorbedor, se calcula con las señales de los 37 termopares situados detrás del absorbedor (°C).
- CT144: Temperatura media del aire de retorno al receptor, se calcula con las temperaturas del aire frío de retorno al receptor (°C).
- C310: Radiación normal directa (W/m²).

Como puede observarse las variables CT015 y CT060 evolucionan claramente a lo largo del ensayo, siendo el ensayo realizado el día 09/08/2013 el mejor dada las condiciones meteorológicas y de radiación solar. En este ensayo se pueden diferenciar 5 instantes fundamentales, caracterizados por la evolución de la temperatura CT060: a) en el instante t0 (figura 6.17) todos los helióstatos están en seguimiento desfasado, la temperatura del receptor es de 39 °C (equivalente a la temperatura ambiente); b) en el instante t1 (figura 6.18) los helióstatos 143, 144 y 145 son enfocados, tras estabilizarse el receptor se llega a alcanzar una temperatura de 83 °C ; c) en el instante t2 (figura 6.19) los helióstatos 146, 147 y 148 son enfocados, en el receptor se alcanzan los 125 °C; d) en el instante t3 (figura 6.20) los helióstatos 146, 147 y 148 son desenfocados, la temperatura del receptor desciende hasta 91 °C; e) en el instante t4 (figura 6.21) los helióstatos 143, 144 y 145 son desenfocados, al no haber ningún helióstato enfocado la temperatura desciende hasta los 50 °C.



Figura 6.17. Estado del sistema en el instante t0, todos los helióstatos están en seguimiento desfasado

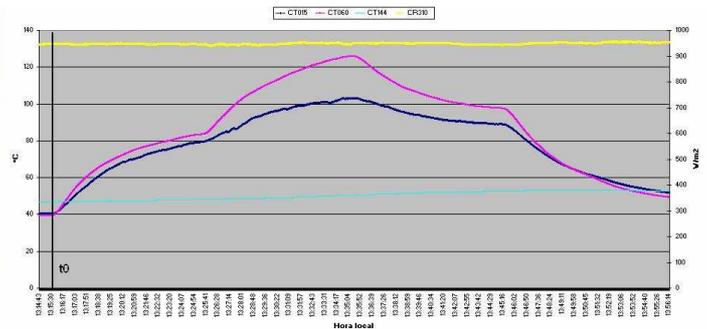


Figura 6.18. Estado del sistema en el instante t1, los helióstatos 143, 144 y 145 son enfocados

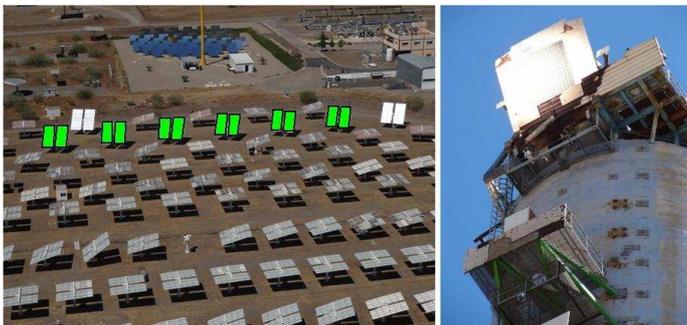
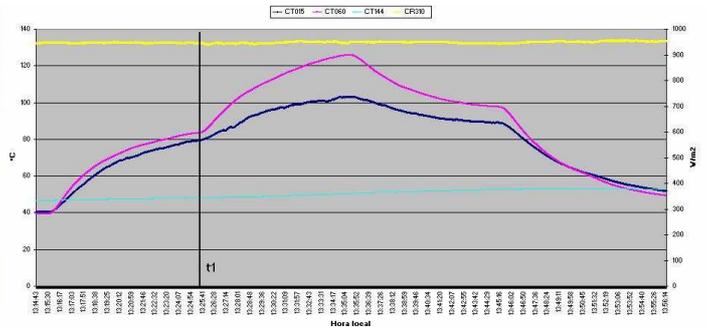
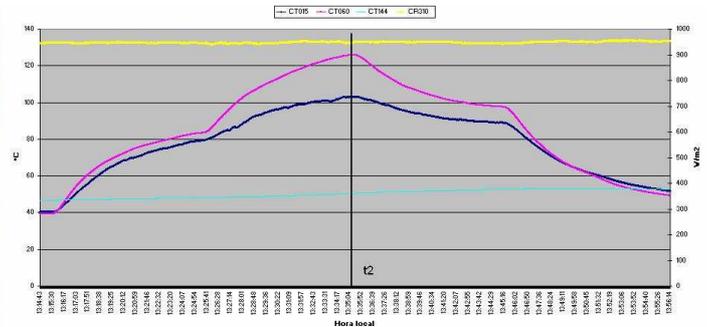


Figura 6.19. Estado del sistema en el instante t2, los helióstatos 143, 144, 145, 146, 147 y 148 están enfocados



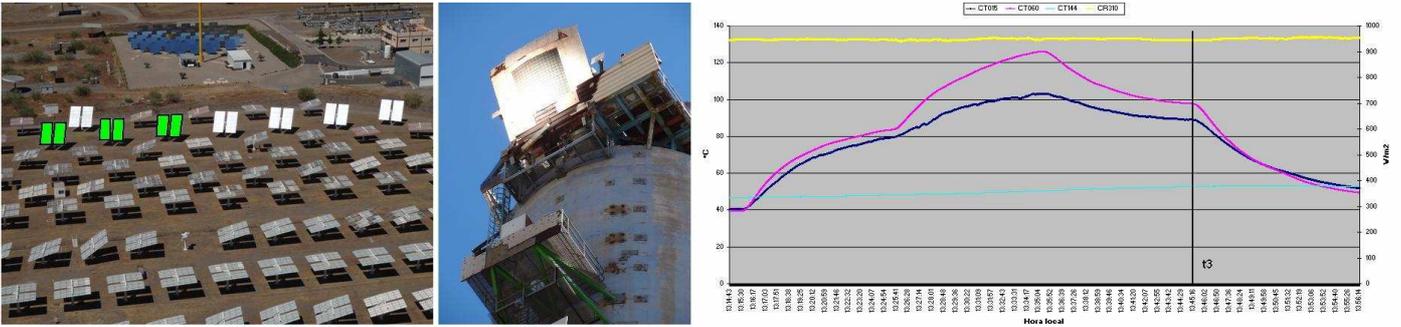


Figura 6.20. Estado del sistema en el instante t3, los heliostatos 146, 147 y 148 son desenfocados

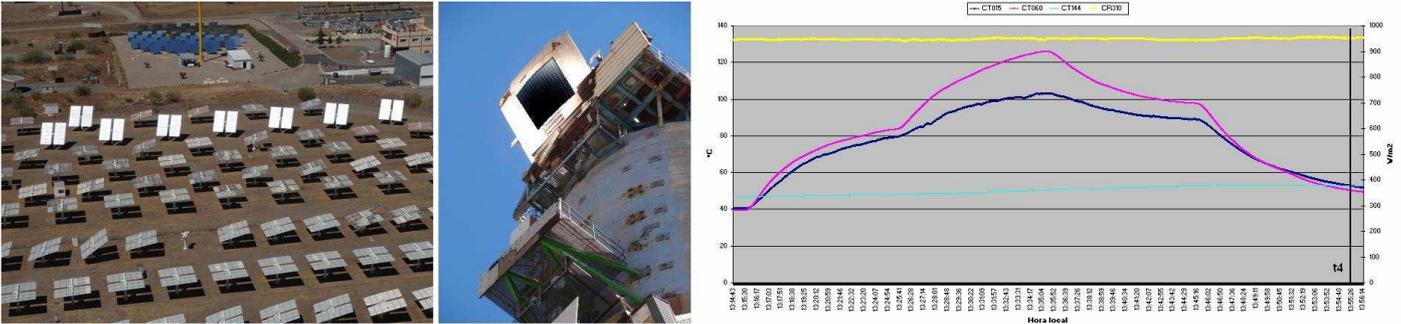


Figura 6.21. Estado del sistema en el instante t4, todos los heliostatos están en seguimiento desfasado.

VII. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han descrito los diferentes pasos que se han seguido para el diseño e implementación de herramientas software para el desarrollo de estrategias de control en el campo de heliostatos del CESA-1 de la PSA. En un primer paso ha sido necesario investigar y analizar las actuales instalaciones para poder caracterizar el sistema en su conjunto, tras este paso ha sido necesario analizar los actuales sistemas de control del campo de heliostatos (HFCS) y del receptor central (CRCS) gracias a lo cual se han detectado una serie de carencias que se han procedido a solventar.

Tras la implementación del nuevo HFCS basado en estándares industriales de comunicaciones, Modbus para el bus de campo y OPC para el bus de datos, se han obtenido en los primeros ensayos resultados satisfactorios de rendimiento y fiabilidad, con tasas de error del 1,25% en la comunicación desde el HFCS hacia los controles locales que integran el campo de heliostatos. Los elementos fundamentales que han ayudado a la consecución de tal rendimiento han sido: a) la introducción en el sistema de los Controles de Comunicaciones del Campo de Heliostatos (HFCC), ya que se comprueba que cumplen perfectamente con su cometido de concentrador de comunicaciones y de elemento sectorizador del campo de heliostatos; b) la creación de un servidor OPC-DA compacto con un tiempo de respuesta de 1,5 s para la ronda básica de comunicaciones y de otro OPC-DA extendido para peticiones más complejas.

Como era de prever, esta nueva forma de estrategia de comunicación basada en estándares industriales ha facilitado la integración dentro del SCADA actual del TSA de las herramientas software necesarias para poder desarrollar

estrategias de control de forma fácil y rápida. Queda comprobado que la utilización del protocolo de comunicaciones OPC permite la integración de los mecanismos necesarios para poder establecer la comunicación y trasiego de información entre el HFCS y el CRCS, como lo demuestra el ensayo realizado del lanzamiento de un lazo de control para el enfoque y desenfoco automático de 6 heliostatos.

VIII. FUTUROS TRABAJOS

Para el futuro queda por integrar los sistemas de Control del Campo de Heliostatos (CFCS) y de Control del Receptor Central (CRCS) en el SCADA del sistema TSA-SOLAIR, sin olvidarnos del hecho de que es necesario realizar varios ensayos exhaustivos en el sistema, una vez que dichas instalaciones estén totalmente operativas.

También queda como tarea pendiente la integración dentro del CRCS de la posibilidad de poder ejecutar varios lazos de control simultáneamente. Gracias a esta funcionalidad podremos extraer del actual SCADA los cuatro lazos de control que se están ejecutando para la automatización del subsistema del receptor central, de esta forma podremos recalibrar sus condiciones de operación o sencillamente cambiarlos fácilmente por otros.

En lo referente al tratamiento de los datos a nivel de históricos, queda pendiente una más compleja manipulación y filtrado de los mismos. También queda pendiente la inclusión de alarmas y eventos dentro del CRCS, así como su tratamiento.

Por último será necesaria a medio plazo la migración de la arquitectura OPC convencional hacia la nueva generación estándar OPC-UA (OPC Unified Architecture). Mientras que OPC convencional resuelve los problemas de interoperabilidad

a nivel de sistemas de control de procesos, la demanda por el mismo nivel de estandarización ha sido requerida por el área de análisis de la información. El estándar OPC clásico está basado en Microsoft COM/DCOM el cual introduce vulnerabilidad a todas éstas áreas. La necesidad de encontrar simplicidad, máxima interoperabilidad y seguridad ha llevado a la OPC Foundation a la creación de un método de comunicación unificado para las actuales especificaciones OPC DA, HDA, A&E, y Seguridad. Con la nueva especificación "Unified Architecture" se crea la base para una tecnología de información y comunicación de plataforma neutral. La escalabilidad, capacidad de red, independencia de la plataforma y seguridad proporcionada por UA permiten su aplicación desde el nivel de control hasta los niveles MES y ERP [35].

OPC UA (Arquitectura Unificada) extiende el gran éxito del protocolo de comunicación OPC para la adquisición de datos, el modelado de la información y la comunicación entre planta y aplicaciones de una forma fiable y segura. El nuevo estándar OPC-UA se basa sobre comunicaciones TCP y es de este modo independiente de la plataforma. La encriptación integrada de datos UA según los estándares internacionales de seguridad garantiza una comunicación segura entre el cliente y el servidor.

Las principales características y beneficios que se obtendrán con esta nueva generación de OPC-UA son [10]: a) plataforma neutral que funciona en cualquier sistema operativo; b) preparada para el futuro y para comunicar con sistemas antiguos; c) fácil configuración y mantenimiento; d) tecnología orientada a servicios; e) aumento de la visibilidad; f) mayor alcance de la conectividad; g) alto rendimiento

IX. REFERENCIAS

- [1] L. J. Yebra, M. Berenguel, M. Romero, D. Martínez, A. Valverde, **Automation of solar Plants**. EUROSUN 2004. The 5th ISES Europe Solar Conference, 20-23 June 2004, Freiburg, Germany.
- [2] F. J. García-Martín, M. Berenguel, A. Valverde, E. F. Camacho, **Heuristic Knowledge-based HelioStat Field Control for the Optimization of the Temperature Distribution in a Volumetric Receiver**. 1999. *Solar Energy*, 66(5), pp. 355-369.
- [3] M. Haeger, L. Keller, R. Monterreal, A. Valverde. **Phoebus technology program solar air receiver (TSA)**. 1996. Internal Report PSA.
- [3b] M. Haeger, L. Keller, R. Monterreal, A. Valverde. **Phoebus technology program solar air receiver (TSA) "operational Experiences with the Experimental Set-Up of a 2,5 MWh Volumetric Air Receiver (TSA) at the Plataforma Solar de Almería"**. (Ref.PSA-TR02/94), 1994
- [4] G. García, A. Egea, J. A. Gázquez, **El heliostato autónomo**. 2000.
- [5] Plataforma Solar de Almería (2012). **Annual Technical Report 2012**. CIEMAT, 2012.
- [6] J. D. Álvarez, M. Berenguel, A. Valverde, M. Romero, L. J. Yebra, E.F. Camacho, F.R. Rubio. **Diseño e implementación de los sistemas de control de un receptor solar volumétrico y de la etapa de potencia de una central eléctrica termosolar**. XXIV Jornadas de Automática, León. 2003.
- [7] J. González, L. J. Yebra, M. Berenguel, A. Valverde, M. Romero. **Sistema de tiempo real distribuido para el control de campos de heliostatos**. XXV Jornadas de Automática, Ciudad Real. 2004.
- [8] J. González, L. J. Yebra, A. Valverde, M. Berenguel, M. Peralta. **Aplicación de sistemas de tiempo real en plantas termosolares**. CEDI - Congreso Español de Informática. I Simposio sobre Sistemas de Tiempo Real (Jornadas de Tiempo Real). 2005.
- [9] Página Web oficial del protocolo de comunicaciones Modbus. **Descripción detallada del protocolo Modbus**. <http://www.modbus.org/specs.php>
- [10] Página web oficial de la **Fundación OPC (OLE for Process Protocol)**. <http://www.opcfoundation.org/>
- [11] R. Medina. **"LabVIEW User Manual"**. National Instruments Corporation, 2002.
- [12] A. M. Lázaro. **"LabVIEW 6i, Programación Gráfica para el Control de Instrumentación"**, Thomson Editores Spain, Paraninfo S.A., 2001
- [13] A. Rodríguez. **Sistemas SCADA**. Marcombo, 2006.
- [14] F. Rodríguez, M. Berenguel, J. L. Guzmán. **Monitorización y supervisión de procesos industriales**. Máster en Informática Industrial. Dpto. de Lenguajes y Computación. Universidad de Almería, Curso 2008/2009.
- [15] F. Rodríguez. **Redes de comunicaciones industriales**. Máster en Informática Industrial. Dpto. de Lenguajes y Computación. Universidad de Almería., Curso 2008/2009.
- [16] J. D. Álvarez. **Estrategias de control de intercambiadores de calor en plantas termosolares**. Tesis doctoral. Universidad de Almería (España), pp. 559, 2008.
- [17] Página web oficial del grupo de investigación **"Automática, Electrónica y Robótica" (AER, código TEP197 del Plan Andaluz de Investigación)**. <http://aer.ual.es>
- [18] R.W. Hallet, R.L. Gervais, 1977. **Central receiver solar thermal power system**, vol. III, Book 2, SAN-1108-76-8, MDC G6776, McDonnell Douglas Corp
- [19] Página web relacionada con el control de plantas termosolares. **Proyectos y otra información sobre modelado, simulación y control en plantas termosolares**. <http://hercules.us.es/~arahal/termosolar.htm>
- [20] Página web de Aunergy Thermosolar S.R.L., sobre el control del campo de heliostatos. **HelFiCo (HelioStat Field Control)**. <http://www.aunergy.com/en/helfico/>
- [21] M. Berenguel, F. R. Rubio, A. Valverde, P. J. Lara, M. R. Arahal, E. F. Camacho, M. López. **An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant**. 2003. *Solar Energy*, 76, pp. 563-575.
- [22] J. D. Álvarez, M. Berenguel, L. J. Yebra, **Strategies of integrated control for energy solar plants**, I SOLLAB Doctoral Colloquium, 2005. Colonia (Alemania)
- [23] M. Berenguel, E. F. Camacho, F. J. García-Martín, F. R. Rubio. **Temperature Control of a Solar Furnace**. *IEEE Control System Magazine*, vol. 19, 1, pp. 8-24, Feb. 1999.
- [24] E. F. Camacho, M. Berenguel, F. R. Rubio. **Advanced Control of Solar Plants**. London. Springer-Verlag, 1997. ISBN 3540761446.
- [25] E. F. Camacho, F.R. Rubio, F. M. Hughes. **Self-tuning control of a solar power plant with a distribute collector field**. *IEEE Control Systems Magazine*, 12(2): 72-78, 1992
- [26] F. R. Rubio, M. Berenguel, E. F. Camacho. **Fuzzy logic control of a solar power plant**. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 3(4): 459-468, 1995
- [27] J. D. Álvarez, M. Berenguel, L. J. Yebra, **Strategies of integrated control for energy solar plants**, I SOLLAB Doctoral Colloquium, 2005. Colonia (Alemania)
- [28] E. F. Camacho, M. Berenguel, R. R. Rubio, D. Martínez. **Control of Solar Energy Systems**. Ed. Springer. *Advances in Industrial Control*, 2012. ISBN 978-0-85729-915-4
- [29] J. Colomer, J. Meléndez, J. Ayza. **Sistemas de supervisión**; Ed. Cuadernos CEAIFAC, 2000.
- [30] D. C. Schmidt, S. D. Huston, **C++ Network Programming: Mastering Complexity Using ACE and Patterns**. 2003. Addison-Wesley Longman.
- [31] D. C. Schmidt, S. D. Huston, **C++ Network Programming: Systematic Reuse with ACE and Frameworks**. 2003. Addison-Wesley Longman.
- [32] **TAO Developers Guide**. Object Computing, Inc., 2000.
- [33] J. González, M. Berenguel, L. J. Yebra, A. Valverde. **Control de procesos usando entornos de tiempo real**. VIII Jornadas de tiempo real, Bilbao. 2005.
- [34] J. González, L. J. Yebra, A. Valverde, M. Berenguel, M. Peralta. **Aplicación de tiempo real para el control de campos de heliostatos**. XXVII Jornadas de Automática, Almería. 2006.
- [35] F. Rodríguez, J.C. Moreno, A. Gimenez, J.F. Bienvenido. **Fabricación asistida por ordenador**. Máster en Informática Industrial. Dpto. de Lenguajes y Computación. Universidad de Almería., Curso 2008/2009.

La instalación del proyecto TSA (Programa de Tecnología de Receptor Solar de Aire) situado en la PSA está formado por dos subsistemas principales: el Sistema de Control del Campo de Helióstatos (HFCS) y el Sistema de Control del Receptor Central (CRCS). Por un lado el objetivo principal del HFCS es generar una distribución de temperatura o radiación uniforme en espacio y tiempo en el receptor central, para lo cual el HFCS posicionará cada helióstato del campo en las posiciones de operación necesarias. Por otro lado el objetivo principal del CRCS es regular la presión y la temperatura del vapor generado en el intercambiador de calor, para lo cual el CRCS establecerá las consignas necesarias en los elementos del receptor solar y de su etapa de potencia. El actual sistema de control del TSA está implementado mediante dos controles centrales, uno dedicado exclusivamente al HFCS y otro al CRCS. Este escenario es más que suficiente para operar el sistema, pero la ausencia de comunicación completa entre ambos subsistemas imposibilita el planteamiento de estrategias de control más complejas. A este hecho debemos añadir que el campo de helióstatos del sistema está actualmente en plena fase de sustitución de sus controles locales por otros más modernos, por lo que a corto plazo el actual HFCS quedará obsoleto y surge la necesidad imperiosa del desarrollo de un nuevo HFCS que pueda gobernar estos nuevos controles locales.

Para subsanar estas carencias se aborda en este trabajo la implementación de un nuevo HFCS y la modificación del actual sistema de control del proyecto TSA para permitir la comunicación y trasiego de información entre los dos subsistemas principales que forman el sistema de TSA. Con ello se pretende que el sistema de control central tenga la posibilidad de poder desarrollar estrategias de control que permitan la coordinación automática de las distintas estrategias de apunte de los helióstatos del HFCS y de las distintas estrategias de control y automatización de operación en el CRCS.

The installation of the TSA Project (Technology Program Solar Air Receiver) at PSA is formed by two main subsystems: the Heliostats Field Control System (HFCS) and the Central Receiver Control System (CRCS). On the one hand, the main purpose of the HFCS is to generate an even distribution in space and time of the temperature or radiation in the central receiver, for that the HFCS will position each heliostat of the field in the required operating position. On the other hand, the main purpose of the CRCS is to regulate the pressure and the temperature of the steam generated in the heat exchanger. For that, the CRCS will set the required orders to the solar receiver and the power stage. The present TSA control system is implemented with two central controls, one devoted to HFCS and the other to CRCS. This scenario is sufficient to operate the system, but the lack of total communication between both subsystems makes impossible to approach more complex control strategies. To this, we must add the fact that the local controls of the heliostats field are currently being replaced by modern ones, so in a short term the current HFCS will be obsolete and the urgent need to develop a new HFCS to drive new local controls arises.

To make up for this lack, the present work approaches the implementation of a new HFCS and the modification of the current TSA control system allowing the communication and information transfer between the two main subsystems forming the TSA system. It is intended that the central control system can develop control strategies allowing the automatic coordination of the different focusing strategies of the HFCS heliostats and automatic operation of the CRCS.

