

SISTEMA DE TIEMPO REAL DISTRIBUIDO PARA EL CONTROL DE CAMPOS DE HELIÓSTATOS

Jose González*⁺, Luis Yebra*, Manuel Berenguel⁺, Antonio Valverde*, Manuel Romero*

*CIEMAT-Plataforma Solar de Almería (PSA), Carretera Senés s/n, 04200 Tabernas, Almería

⁺Dpto. Lenguajes y Computación, Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, 04120 Almería

jose.gonzalez@psa.es, luis.yebra@psa.es, beren@ual.es, antonio.valverde@psa.es, manuel.romero@ciemat.es

Resumen

Para hacer rentable la producción de electricidad a partir de energía solar es necesario maximizar la eficiencia, para lo que se utilizan técnicas de control automático. Aparte de la producción de electricidad, las plantas termosolares son utilizadas para otros fines como pueden ser el análisis de comportamiento de materiales a altas temperaturas. Las grandes concentraciones de energía que se producen pueden suponer un riesgo para las personas y las instalaciones si no son controladas de una forma adecuada. En este artículo se muestran los trabajos que se están realizando en la Plataforma Solar de Almería para la implantación de un sistema de tiempo real distribuido cuya función es el control de campos de helióstatos en instalaciones de receptor central.

Los trabajos se están desarrollando en el ámbito del convenio entre el CIEMAT-Plataforma Solar de Almería y el grupo de investigación "Automática, Electrónica y Robótica" (TEP-197) titulado "Desarrollo de sistemas y herramientas de control para plantas termosolares".

Palabras clave: Sistemas de tiempo real distribuido, plantas termosolares, sistemas de receptor central.

1 INTRODUCCIÓN

El uso de sistemas de tiempo real está justificado cuando retrasos en el instante en el que se debe dar una respuesta o hacer una operación suponen una disminución lo suficientemente significativa de la producción, un perjuicio económico importante o un riesgo para las personas o instalaciones, dependiendo del sistema en particular. El funcionamiento de algunas instalaciones en centrales solares pueden incurrir en alguno de estos riesgos debido a que se trabajan con concentraciones solares en las que se alcanzan temperaturas muy elevadas. Errores tanto en el resultado de los cálculos como en el tiempo de respuesta a la hora de indicar las consignas que sitúan estas concentraciones pueden dar lugar a daños personales y

daños irreparables en los componentes irradiados. Es por ello que estos sistemas entren dentro del ámbito de aplicación de los Sistemas de Tiempo Real.

En este artículo se describe el trabajo que se está realizando en la Plataforma Solar de Almería (PSA, <http://www.psa.es/>) para la implantación de un Sistema de Tiempo Real Distribuido para el Control de Campos de Helióstatos. En primer lugar se describirá el sistema que debe ser controlado dentro de PSA. Después se enunciarán los objetivos que se desean cumplir con la implantación del sistema, seguido de algunas indicaciones sobre el diseño e implementación que se están realizando. En último lugar se expondrán algunas conclusiones de interés obtenidas hasta el momento.

2 PLANTAS DE ENERGÍA SOLAR DE RECEPTOR CENTRAL

Los sistemas de receptor central de una planta solar pueden descomponerse en dos subsistemas. Por un lado el campo de helióstatos y por otro el receptor junto al sistema de potencia [7]. La función principal del campo de helióstatos es la de reflejar y concentrar la radiación solar incidente sobre el campo en unos puntos determinados dentro del receptor. El funcionamiento del sistema de receptor central precisa que cada uno de los helióstatos 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], [4]). La aplicación que se está desarrollando en PSA se encargará del control del subsistema del campo de

helióstatos.

2.1 Instalaciones de Receptor Central en PSA

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.

PSA dispone entre sus instalaciones de dos Sistemas de Receptor Central: CESA-I (7 MWt) y SSPS-CRS (2,7 MWt). El campo CESA-I fue inaugurado en 1983 y opera como instalación para ensayos de componentes relacionados con la energía solar (helióstatos, receptores, etc.). Este campo, de 330 por 250 m., dispone de 300 helióstatos 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 45 m, 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. En la figura 1 se puede ver el campo de helióstatos y la torre del campo CESA-I.



Figura 1: Sistema de Receptor Central CESA-I de PSA

La planta SSPS-CRS fue inaugurada en 1981. Actualmente es una instalación de ensayos dedicada a la prueba de pequeños receptores. El campo está formado por 91 helióstatos de $39,3 \text{ m}^2$ de superficie (figura 2). Existe un segundo campo, al norte de éste, con 20 helióstatos de 52 m^2 y 65 m^2 . Dispone de una torre metálica de 43 m. de altura y tiene de dos plataformas de ensayo. La primera

plataforma, ocupando dos niveles a 32 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.



Figura 2: Vista de un heliostato del campo SSPS-CRS reflejando la torre

En el 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 que deben alcanzar. En el campo SSPS-CRS, a diferencia del campo CESA-I, se utilizan comunicaciones inalámbricas y los helióstatos funcionan de una forma más autónoma [1], lo que permite independizarlos un poco del control central, el cual tendrá una función más orientada a la supervisión.

2.2 Funcionamiento del heliostato

Para orientarlos, los helióstatos poseen dos ejes con sendos grados de libertad: un eje en elevación y otro en azimut. 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. Además, desde el punto de vista del operador, un heliostato puede estar realizando dos operaciones básicas: posicionándose en una orientación fija o realizando seguimiento a una coordenada.

El seguimiento continuo a una coordenada consiste en conseguir que el rayo reflejado del heliostato se quede incidiendo constantemente sobre un punto del espacio. La realización del seguimiento supone el cálculo de los valores de consigna de elevación y azimut a partir de la co-

ordenada donde se quiere incidir, de la posición del helióstato en el campo (respecto a la torre) y de la fecha y hora con la que se puede obtener la posición del sol en el cielo. Puesto que el sol va cambiando su posición en el cielo constantemente, es necesario recalcular periódicamente las consignas de elevación y azimut.

La frecuencia con la que estas consignas son recalculadas va a depender del tiempo empleado en hacer los cálculos, del usado en realizar la comunicación con cada helióstato y del número de éstos en el campo. Si a estos cálculos unimos la necesidad de poder indicar rápidamente unas consignas de emergencia cuando ocurre alguna situación peligrosa, como puede ser la elevación de la temperatura por encima de ciertos umbrales en lugares determinados, hacen que se requiera un soporte de tiempo real estricto.

En el caso del campo CESA-I las consignas deben ser actualizadas periódicamente por un control central. Sin embargo, en el campo SSPS-CRS se dispone de unos controles locales más complejos que realizan los cálculos de las consignas cuando se les indica la coordenada de seguimiento, liberando de esta forma de una gran cantidad de cálculo al control central.

3 OBJETIVOS DEL CONTROL DEL CAMPO DE HELIÓSTATOS

En PSA se está desarrollando una aplicación para el control de campos de helióstatos donde los principales objetivos buscados son los siguientes:

- La aplicación debe ser lo más *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, proporcionará 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 ésta 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 módulo 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 que se están creando, se está haciendo uso de las librerías ACE ([5], [6]). 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.

4 ASPECTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Los requisitos temporales que se han definido en el sistema son los siguientes:

- El control central (la aplicación) debe comunicarse con cada helióstato al menos una vez cada 4 segundos. El control local tardará un máximo de 1 milisegundo en iniciar la transmisión de la respuesta, a contar desde el mo-

mento de la recepción del último byte de un mensaje válido proveniente del control central y en el que se pida respuesta. El control central, 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 a priori no se conoce el número de helióstatos del campo ni la capacidad de computación de la que dispone el control central, quedan claro los beneficios de una posible distribución de los distintos componentes del control central.

- Se deben adquirir un número determinado de muestras de temperatura cada segundo. Los valores de estas muestras, cuando rebasan ciertos límites, deben generar una alarma y desenfocar todos los helióstatos.
- 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 ejecutará 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) [8].

En lo que respecta a la interfaz gráfica para el operador, se están usando el entorno gráfico X-Window y el estándar Motif. Este módulo 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 válido para la aplicación que se está desarrollando.

El uso de objetos CORBA permitirá 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 helióstatos. 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 número de

plataformas, entre las que se encuentran Microsoft Windows, Linux y LynxOS, que son las usadas principalmente en PSA.

Trabajos previos realizados en PSA usando un Cluster Beowulf basada en redes Ethernet conmutadas de 100 Mb/s han demostrado la baja latencia y sobrecarga que TAO introduce en aplicaciones distribuidas de tiempo real [3].

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 helióstatos, etc. Se va a distinguir principalmente tres tipos de módulos distribuibles en la aplicación: los objetos que gestionan los helióstatos, los módulos de comunicaciones y la interfaz del operador.

4.1 Objetos helióstato

El helióstato será el componente principal del campo y deberá ser controlado individualmente. Para ello se creará un objeto lógico activo con respuesta determinista (restricciones de tiempo real estrictas) dentro de la aplicación en el que se almacene toda la información relativa al helióstato físico. Este objeto actuará como interfaz ofreciendo un conjunto de operaciones de más alto nivel como pueden ser el dirigir el rayo reflejado hacia unas coordenadas concretas (seguimiento) o el elevar el rayo reflejado a unas coordenadas cercanas al receptor siguiendo una ruta (pasillo de seguridad) que no ponga en peligro a las personas o a las instalaciones. Cada objeto se encargará de la gestión completa de estas operaciones de alto nivel que incluyen la comunicación con el control local del helióstato físico.

Como se ha comentado, éste es un objeto activo que tendrá dos tareas independientes. Una tarea estará encargada de gestionar el estado del helióstato, el cual puede variar bien por llamadas de otros módulos de la aplicación a métodos de la interfaz de objeto helióstato o bien por respuestas concretas del control local del helióstato físico. La función de la otra tarea será la de efectuar las comunicaciones necesarias con el control local del helióstato físico dependiendo del estado actual. Se ha optado por separar la manipulación del estado actual del objeto helióstato y las comunicaciones de éste debido a que las comunicaciones pueden incurrir en bloqueos debidos a otros helióstatos pertenecientes a la misma línea de comunicaciones. Mediante esta separación se posibilita la evolución inmediata del estado actual, lo que puede ser importante ante situaciones de emergencia.

ciones 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 éste 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, liberará el mutex del módulo permitiendo a otro objeto heliostato acceder al canal de comunicación.

4.3 Interfaz de operador

Para la manipulación del campo de heliostatos se está desarrollando una interfaz que será usada por un operador. Esta interfaz se encargará de gestionar los distintos tipos de ensayos disponibles para cada campo y de hacer llegar los comandos a los objetos heliostato. En la figura 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.

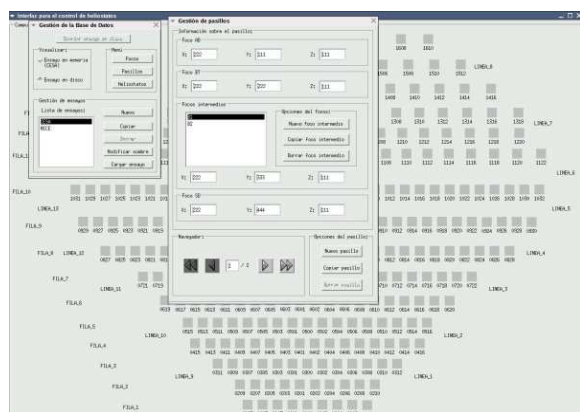


Figura 4: Interfaz gráfica usada por el operador para manipular el campo de heliostatos

4.4 Distribución de objetos

La figura 5 muestra el flujo de datos que existe en la aplicación, partiendo de la interfaz gráfica del operador hasta llegar al heliostato físico. Intuitivamente se pueden observar tres niveles en los que se podrían distribuir los objetos que forman la aplicación, que son los anteriormente descritos. Una distribución lógica podría ser la de ubicar la interfaz gráfica en un computador y después asignar para cada módulo de comunicaciones y los heliostatos que lo usen a un computador. Sin em-

bargo, 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.

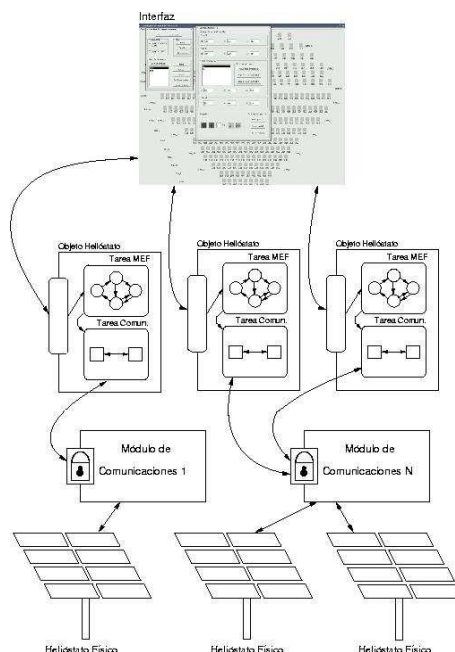


Figura 5: Flujo de información a través de los objetos de la aplicación

Una vez probada esta configuración inicial se pretende variar las distribuciones viendo las posibles sobrecargas del sistema.

5 CONCLUSIONES

Desde PSA se está desarrollando una aplicación para que pueda ser implantada como control de campos de heliostatos en centrales solares de torre. Se desea que esta aplicación no se restrinja a los campos de PSA y por ello se está diseñando como una aplicación distribuida que facilite su escalabilidad en previsión de que sea instalada en campos con distinta topología y número de heliostatos. Además, debido a las restricciones temporales existentes en el sistema de control del campo es necesario su ejecución en un sistema de tiempo real estricto. Se está realizando el diseño de la aplicación usando RT-UML y se está implementando ciertas partes como puede ser la máquina de estados finitos, los módulos de comunicaciones y algunas funciones de la interfaz gráfica.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el ámbito del acuerdo específico de colaboración entre el CIEMAT-Plataforma Solar de Almería y el

Grupo de Investigación “Automática, Electrónica y Robótica” de la Universidad de Almería (TEP-197) titulado “Desarrollo de sistemas y herramientas de control para plantas termosolares” y de los proyectos financiados por la MCYT DPI2001-2380-C02 y DPI2002-04375-C03.

Referencias

- [1] G. García, A. Egea, J. A. Gázquez, *El helióstato autónomo*. 2000
- [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] R. Garrote, *Análisis, diseño y aplicación de un sistema de control distribuido basado en CORBA*. 2004. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Almería.
- [4] M. Haeger, L. Keller, R. Monterreal, A. Valverde. *Phoebus technology program solar air receiver (TSA)*. 1996. Internal Report PSA
- [5] D.C. Schmidt, S.D. Huston, *C++ Network Programming: Mastering Complexity Using ACE and Patterns*. 2003. Addison-Wesley Longman.
- [6] D.C. Schmidt, S.D. Huston, *C++ Network Programming: Systematic Reuse with ACE and Frameworks*. 2003. Addison-Wesley Longman.
- [7] 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
- [8] *TAO Developers Guide*. Object Computing, Inc., 2000.