

SISTEMA CONTROLADOR DE POSICIONADORES ANGULARES DE 2 GDL PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

O. Collazo, M.G. Ortega, F.R. Rubio, F. Gordillo
Depto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla
e-mail: { collazo, ortega, rubio, gordillo }@cartuja.us.es

Resumen

En este artículo se describe la implementación de un dispositivo diseñado para el control de posicionadores angulares de dos grados de libertad, en especial los posicionadores de paneles fotovoltaicos. El diseño de dicho dispositivo, en adelante denominado unidad de control, ha sido diseñado íntegramente en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla atendiendo a tres especificaciones básicas: autonomía, robustez y versatilidad.

Palabras Clave: Unidad de control, paneles fotovoltaicos, control de seguimiento del Sol.

1 INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de las energías renovables, como la energía solar o la eólica, está cobrando mucha fuerza en los últimos tiempos. En particular, la energía solar permite el abastecimiento de energía eléctrica en zonas aisladas o poco accesibles a las que no llega el suministro de las redes eléctricas. Incluso se puede garantizar un abastecimiento continuo mediante el uso de acumuladores. Sin embargo, los sistemas fotovoltaicos actuales tienen un rendimiento inferior al deseable. Los paneles fotovoltaicos suelen estar dispuestos en posiciones fijas, con lo cual, el máximo aprovechamiento de la energía solar sólo se produce a determinadas horas del día, e incluso depende mucho de la estación climática. Para solventar estos problemas se han adoptado varias soluciones, como las células fotovoltaicas de alto rendimiento o los paneles solares móviles. Este artículo se centra en esta última opción. El uso de sistemas de posicionamiento angular permite tener orientados permanentemente los paneles hacia el Sol, lo cual posibilita obtener siempre el máximo rendimiento de la instalación.

En los siguientes apartados se describe con detalle la estructura de la unidad de control y su funcionamiento. Finalmente se incluye un apartado de conclusiones.

2 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE CONTROL

La unidad de control de paneles fotovoltaicos (figura 1) es un dispositivo ideado para controlar posicionadores angulares de dos grados de libertad. En este caso particular, hemos orientado su diseño específicamente para controlar y monitorizar posicionadores de paneles fotovoltaicos (figura 2).



Figura 1: Vistas de la unidad de control

Está diseñada para funcionar de forma autónoma, aunque también está dotada de una alta conectividad que facilita su integración en sistemas de control de mayor envergadura.

Sus reducidas dimensiones hacen a esta unidad apta para ser instalada en cualquier espacio. De la misma forma su bajo consumo facilita aún más su instalación.



Figura 2: Sistema de posicionamiento angular de paneles fotovoltaicos

Dispone de dos puertos de comunicaciones:

- Puerto serie RS-232: Este puerto ha sido diseñado para comunicaciones con periféricos externos y otros elementos del sistema de control, como sensores o buses de campo. También puede ser usado como puerto de propósito general en comunicaciones de corta distancia. En tareas de depuración, permite cargar y depurar programas en el microcontrolador de la unidad.
- Puerto serie RS-485: A diferencia del anterior, éste está diseñado para comunicaciones de larga distancia con estaciones remotas de supervisión, control y monitorización. En este puerto se implementa un bucle de intensidad RS-485, que permite establecer enlaces robustos de larga distancia y en entornos de interferencias de tipo EMI.

La unidad de control dispone además de un tercer puerto para el control del posicionador. Todas las señales involucradas en el funcionamiento del posicionador son accesibles a través de este puerto. Ello nos permite canalizar todas las señales relacionadas con los encoders, las señales de control de ambos motores, los interruptores de final de carrera, además de la tensión de alimentación del resto de electrónica implementada en el posicionador (limitadores de intensidad y filtros). Hemos previsto

en este puerto de líneas accesibles para cualquier ampliación necesaria, tal como colocación de nuevos sensores en el posicionador.

El núcleo de esta unidad se basa en un sistema microcontrolador completamente programable. Esto, junto a la amplia gama de periféricos de que dispone, la dota de gran versatilidad en cuanto a implementación de técnicas de control se refiere.

En fases de implementación y pruebas, la carga de programas en el microcontrolador se realiza mediante el puerto serie RS-232. Cuando se emplea para programación, este puerto permite depurar en línea los programas que se cargan en el microcontrolador. Una vez que se dispone de un código completamente funcional, es posible almacenarlo en una memoria de tipo Flash-EPROM, la cual está integrada en el propio módulo del microcontrolador. De esta forma se libera el puerto serie RS-232 de la tarea de carga y depuración, pudiendo destinarse a otros usos. La forma de arranque (memoria Flash o por el puerto serie) se selecciona mediante un conmutador externo.

La programación se realiza en lenguaje de alto nivel. Se emplea una variante del lenguaje C estándar, denominada *Dynamic C* [1]. Esta variante ha sido desarrollada por el fabricante del microcontrolador (*Zworld*) [2], el cual aporta a su vez un entorno de desarrollo y depuración basado en *Microsoft Windows* que permite conocer cualquier parámetro asociado al sistema, tal como variables del programa, registros del microcontrolador o tiempos involucrados.

Nuestro objetivo principal es dotar a la unidad de control de autonomía y robustez. De esta forma, la ejecución de cualquier programa está monitorizada por un sistema *watch-dog* implementado por hardware. Así, cualquier fallo de ejecución implica la desactivación de cualquier señal de control que pudiera dañar el posicionador. De la misma forma, la comunicación con equipos de monitorización permite detectar estos errores de forma rápida y fiable.

Además de los puertos de comunicaciones, la unidad de control dispone de una pantalla LCD y de un teclado que componen una sencilla interfaz de usuario. Esta interfaz permite una actuación directa sobre la unidad de control. Mediante el teclado es posible cambiar el modo de funcionamiento del sistema, de forma que se puedan realizar tareas de mantenimiento in situ. Dentro de cada modo de funcionamiento, se pueden ejecutar una serie de acciones específicas, como visualizar y cambiar parámetros del sistema en el modo de configuración o mover el pedestal directamente con el teclado en el modo manual.

3 COMPONENTES DE LA UNIDAD DE CONTROL

En la unidad de control se pueden distinguir dos partes bien diferenciadas. La primera de ellas es el núcleo de la unidad, formado por una placa en la que están instalados el microcontrolador y todos los periféricos asociados a él. La segunda es el conjunto de periféricos externos, formado por los drivers de potencia, los convertidores de señal, el módulo de lectura de encoders y el sensor de potencia generada por los paneles. En la figura 3 se muestra un esquema de esta estructura.

Por motivos de seguridad, hemos asignado a cada parte su propia fuente de alimentación. El objeto de ello es proteger al sistema microcontrolador de cualquier avería debida a picos de potencia o derivaciones de intensidad provocada por los drivers de potencia. Ello implica la existencia de dos circuitos de alimentación. El primero de ellos, de baja potencia, alimenta al módulo del microcontrolador y al módulo de lectura de encoders. El segundo, de media potencia, alimenta a los drivers de potencia de los motores y al posicionador. Por otro lado, cualquier interconexión establecida entre ambas partes está a su vez aislada eléctricamente mediante optoacopladores y amplificadores de aislamiento.

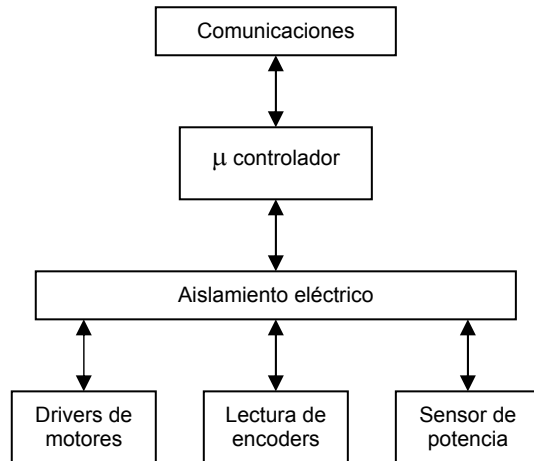


Figura 3: Esquema de la unidad de control

3.1 MÓDULO MICROCONTROLADOR

Consiste en un módulo de desarrollo modelo *PK2100* de *ZWorld* [1], basado en el microprocesador *Z180* de *Zilog*.

Los principales periféricos integrados en el módulo *PK2100* son:

- Puerto de E/S digitales.
- Convertidores D/A y A/D.

- Bus de expansión *PLCBus* para conexión de dispositivos externos.
- Puerto serie RS-485 y puerto serie RS-232.

Todas las conexiones con el módulo del microcontrolador están protegidas contra picos de potencia, independientemente de las protecciones internas de dicho módulo.

Los convertidores D/A se emplean para enviar las señales de control a los motores del posicionador. Dado que los convertidores no pueden proporcionar la potencia que requieren los motores del posicionador, estas señales son posteriormente moduladas y amplificadas convenientemente por los drivers de potencia. Estas conexiones están también protegidas galvánicamente por sendos amplificadores de aislamiento.

Los puertos de entradas y salidas digitales se emplean para controlar el sistema de periféricos externos de la unidad de control. Las entradas digitales se utilizan para gestionar los interruptores de final de carrera del posicionador. Las salidas digitales se emplean para inicializar los contadores de los encoders y para controlar la dirección de movimiento de los motores.

El bus de expansión *PLCBus* permite la conexión de dispositivos externos al módulo del microcontrolador. A través de él se gestiona la tarjeta de lectura de encoders. Dicha tarjeta tiene asignado una parte del espacio de direcciones de memoria externa del microcontrolador. En dicho espacio se encuentran mapeados los registros que almacenan los pulsos generados por cada encoder.

El puerto serie de comunicaciones RS-485 se emplea para comunicación con un PC remoto de supervisión. A través de este puerto se intercambian datos de forma bidireccional con cualquier estación remota conectada a la línea RS-485. Además, es posible la monitorización y el control de la unidad de control a través de una aplicación *SCADA*. Se puede cambiar remotamente el modo de funcionamiento y operar plenamente en dicho modo.

Tanto las entradas y salidas digitales empleadas, así como los convertidores D/A han sido aisladas eléctricamente del sistema de periféricos externos. De esta forma impedimos que cualquier fallo en dicho sistema afecte al sistema microcontrolador. Reducimos aún más el riesgo de averías gracias a los circuitos independientes de alimentación.

3.2 PERIFÉRICOS EXTERNOS

El sistema de periféricos externos está compuesto de cuatro tarjetas:

- Tarjeta de lectura de encoders.
- Tarjeta de lectura de potencia generada.
- Tarjeta de drivers de motores.
- Tarjeta de aislamiento eléctrico.

Estas tarjetas componen son el nexo entre el módulo del microcontrolador y el posicionador.

3.2.1 Tarjeta de lectura de encoders

Esta tarjeta ha sido diseñada para contar los pulsos generados por encoders diferenciales con salidas a colector abierto. La tarjeta pertenece al circuito de alimentación del módulo del microcontrolador, denominado anteriormente circuito de baja potencia. Los encoders no reciben alimentación a través de esta tarjeta, pues pertenecen a circuitos diferentes de alimentación. Las señales generadas por los encoders no están conectadas directamente a este circuito, sino a través de la tarjeta de aislamiento eléctrico mediante optoacopladores.

Incluimos en la tarjeta dos registros en los que se almacenan los pulsos generados por los encoders. Estos registros tienen sendas direcciones asignadas del espacio de memoria externa del microcontrolador. Ello posibilita acceder a las lecturas de los encoders a través del bus de expansión *PLCBus*.

3.2.2 Tarjeta de medida de potencia generada

La medida de la potencia eléctrica generada por los paneles sirve para corregir los errores de seguimiento del posicionador angular.

En efecto, este tipo de posicionadores se ven afectados por perturbaciones de diversa índole. Un ejemplo de error sistemático se debe a una orientación del sistema posicionador inicialmente desviada. Estos posicionadores deben instalarse con una orientación inicial apropiada. En ciertos casos puede ser difícil orientar el posicionador con la precisión requerida.

Como ejemplo de perturbación aleatoria cabe mencionar el efecto del viento sobre la estructura que soporta los paneles. También pueden existir desviaciones de la trayectoria debidas a la propia precisión de las ecuaciones de movimiento del Sol. Estas ecuaciones presentan cierta deriva que debe ser corregida de forma periódica.

La potencia que generan los paneles es proporcional al flujo de energía radiante que incide sobre ellos (figura 4). La constante de proporcionalidad depende de la tecnología empleada en la construcción de las células fotovoltaicas. Si denotamos por I_L el vector de intensidad de radiación solar y por S la superficie

efectiva de la célula fotovoltaica, la proporcionalidad viene dada por la expresión (1).

$$P_{FV} \propto \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_S \vec{I}_L \cdot d\vec{s} \right\} \quad (1)$$

Si suponemos que el frente de ondas de la radiación procedente del Sol es plano, podemos simplificar la expresión anterior, resultando la expresión (2).

$$P_{FV} \propto \frac{\partial \vec{I}_L}{\partial t} \cdot \vec{S} = \frac{\partial I_L}{\partial t} \cdot S \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

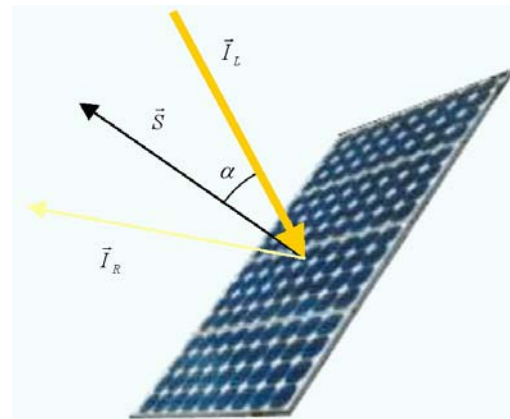


Figura 4: Esquema de incidencia de radiación solar sobre un panel fotovoltaico

En la expresión (2), α es el ángulo formado por la normal del frente de ondas de la radiación solar y la normal a la superficie de los paneles. Cuando este ángulo sea nulo, los rayos solares incidirán perpendicularmente a los paneles. En ese instante, la potencia eléctrica generada será máxima y, por tanto, el posicionador estará orientado correctamente.

El sensor de potencia está diseñado para soportar hasta 1.5 kW, con unos niveles máximos de tensión e intensidad de 150 V y 10 A respectivamente.

Este periférico genera una señal de tensión proporcional a la potencia generada. Dicha señal ha sido aislada galvánicamente mediante un amplificador de aislamiento y está conectada al convertidor A/D del microcontrolador.

3.2.3 Tarjeta de drivers de motores

Las señales de referencia que genera el microcontrolador son señales analógicas sin modulación que no tienen la potencia suficiente como para actuar directamente sobre los motores. Esta tarjeta adapta las señales de referencia de los

motores que genera el módulo del microcontrolador a través de los convertidores D/A.

Los convertidores D/A proporcionan únicamente tensiones positivas de hasta 10 V. Por ello es necesario emplear señales digitales adicionales para indicar el sentido de giro de los motores, que en otros casos quedaría determinado por el signo de la señal de control. El sentido de giro se indica mediante una salida digital del microcontrolador. Esta tarjeta se encarga de integrar la información sobre el sentido de giro en la señal de actuación sobre los motores.

Además de la baja potencia de las señales generadas por los convertidores D/A, dichas señales tampoco tienen un rango dinámico adecuado al de los motores. Así pues, otra de las funciones de este periférico es adaptar el rango dinámico de las señales de control de los motores y amplificar la potencia transmitida mediante dichas señales.

En la primera fase de funcionamiento, la tarjeta aplica una modulación de anchura de pulsos, conocida como modulación PWM [3], sobre las señales generadas por el módulo del microcontrolador. De esta forma, se transforman las señales continuas en trenes de pulsos cuyo período es inferior al tiempo característico de los motores. Así, el efecto sobre los motores es el de la señal continua original.

Tras la modulación, se emplean las señales que indican el sentido de giro de los motores para generar un par de señales que sirven de entrada a un doble puente en H. Estos circuitos se encargan de adaptar la tensión de la señal modulada a la tensión nominal de alimentación de los motores, así como de suministrar la intensidad que requieran. Esta tarjeta permite la operación independiente de cada motor mediante una señal digital procedente del microcontrolador.

3.2.4 Tarjeta de aislamiento eléctrico

Este último periférico es el encargado de aislar eléctricamente el módulo del microcontrolador del sistema de periféricos externos. Además, permite generar la alimentación de las secciones lógicas de todos los componentes. De esta forma, se pueden obtener 5 V del circuito de alimentación del módulo del microcontrolador, así como del circuito de alimentación de periféricos. Cada una de estas fuentes pertenece a circuitos diferentes de alimentación.

El aislamiento eléctrico se realiza de dos formas, dependiendo del tipo de señales. Para las señales digitales se emplean acopladores ópticos, dada la naturaleza digital de dichos dispositivos. En cuanto a las señales de referencia de los motores, son señales

analógicas. Estas señales se aíslan galvánicamente mediante amplificadores de aislamiento.

Por último, la tarjeta genera dos señales de 5 V, cada una de ellas referida a cada uno de los circuitos de alimentación de la unidad de control. De esta forma, cada una de las etapas de electrónica digital de cada parte de la unidad de control está alimentada por su circuito correspondiente.

4 FUNCIONALIDAD DE LA UNIDAD DE CONTROL

4.1 MODOS DE FUNCIONAMIENTO

Hemos establecido tres modos de funcionamiento en la unidad de control:

- Modo de seguimiento automático, en el que se ha implementado un bucle de control de alto nivel basado en realimentación de la potencia generada, y otro de bajo nivel basado en realimentación de posición para control de motores.
- Modo de accionamiento manual, que permite mover el posicionador directamente para tareas de mantenimiento.
- Modo de configuración, mediante el cual se puede modificar cualquier parámetro del sistema: constantes de controladores, velocidades máximas, parámetros del protocolo de comunicaciones, etc.

Los modos se pueden conmutar independientemente de la forma de operación sobre la unidad.

4.2 MODALIDADES DE OPERACIÓN

La forma de operación sobre la unidad de control es de dos tipos: directa y remota.

La forma directa permite manejar la unidad de control mediante el teclado y el display situados en la parte frontal de la caja. Estos dos elementos componen una interfaz sencilla para el usuario. Por pantalla se muestra la información necesaria ejecutar cualquier operación, como cambiar el modo de funcionamiento o dar órdenes directas de movimiento al posicionador. Por otra parte, cada botón del teclado tiene una descripción de la función que realiza.

El inconveniente de la modalidad directa es que es necesario estar en la ubicación de la unidad. En general, la unidad de control se instala en el interior de armarios eléctricos, lo que puede resultar bastante incómodo para el usuario. La modalidad de operación remota elimina esta necesidad y añade otras ventajas.

La operación remota sobre la unidad de control se realiza mediante un ordenador de supervisión y control. Este ordenador está conectado a la unidad a través de una línea serie RS-485. Esto implica ya alguna ventaja. El ordenador puede estar situado en una sala de control lejos de la ubicación real de la unidad. Estas líneas tienen mayor alcance y son menos sensibles a ruidos eléctricos.

4.3 APLICACIÓN SCADA DE LA UNIDAD DE CONTROL

Sobre el ordenador se ejecuta una aplicación SCADA con la que creamos una interfaz entre el usuario y la unidad de control. Esta aplicación aporta aún más ventajas. En primer lugar, la interfaz gráfica de estas aplicaciones permite disponer de forma rápida y sencilla de cualquier información relativa al sistema. En la modalidad directa, el reducido número de caracteres del display, hace más lento el manejo de la información, pues no se pueden mostrar muchos datos a la vez.

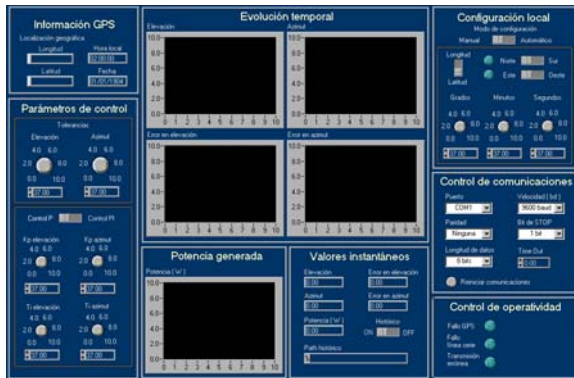


Figura 5: Pantalla principal de explotación de la aplicación SCADA

En segundo lugar, es posible representar gráficamente magnitudes como la posición instantánea o la potencia instantánea generada. Estas representaciones son cualitativamente más significativas que los datos meramente numéricos.

Por último, esta aplicación ofrece la posibilidad de crear ficheros históricos en los que se almacenan todas las magnitudes involucradas en el sistema de control y los eventos que se producen: alarmas, caídas de potencia, finales de carrera, etc.

Además de la aplicación SCADA, hemos creado un modelo tridimensional del posicionador (figura 6). Esto ofrece al usuario seguir el funcionamiento del posicionador de forma mucho más intuitiva.

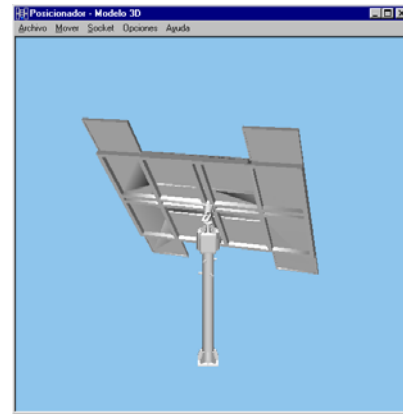


Figura 6: Modelo tridimensional del sistema posicionador de paneles

La aplicación SCADA está desarrollada con LabVIEW [4]. Se compone de una pantalla de explotación principal (figura 5) y otra de funciones básicas (figura 7). Cada pantalla se divide en varios módulos, que permiten manejar aspectos particulares de la unidad de control.



Figura 7: Pantalla de explotación de la aplicación SCADA básica

A modo de ejemplo, se muestran los módulos de control de movimiento y de registro de datos.

El módulo de control de movimiento (figura 8) permite controlar y visualizar el movimiento del posicionador. Dispone de indicadores numéricos que muestran el ángulo instantáneo e indicadores gráficos que muestran la trayectoria seguida durante el período de operación. También permite ejecutar de forma manual movimientos del posicionador.

El módulo de registro de datos (figura 9) permite activar la función de almacenamiento de datos y eventos en archivos históricos, pudiendo configurar varios parámetros como la frecuencia de almacenamiento o el número de datos por fichero.

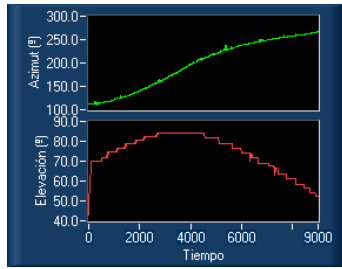


Figura 8: Módulo de control de movimiento



Figura 9: Módulo de registro de datos

Adicionalmente, hemos añadido un módulo de monitorización de comunicaciones (figura 10). Este módulo sirve para supervisar el correcto funcionamiento del protocolo de comunicaciones entre la unidad de control y el SCADA. Esta función es vital para gestión de errores y depuración.

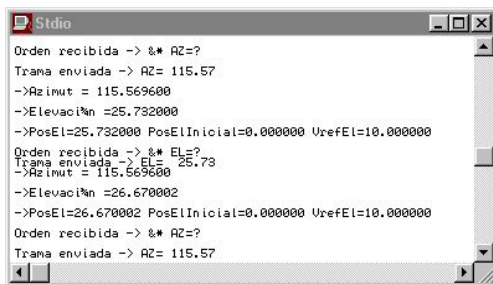


Figura 10: Pantalla de monitorización de comunicaciones.

5 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control se puede dividir en dos subsistemas. El primero es un sistema de control a bajo nivel de los motores, basado en la realimentación de la posición angular. El segundo es un sistema de control de alto nivel basado en la realimentación de potencia generada por los paneles fotovoltaicos. Se muestra un esquema del sistema de control en la figura 11.

El subsistema de control de los motores se encarga de garantizar el correcto posicionamiento de los mismos de acuerdo a una referencia dada. El bucle se cierra con la realimentación de la posición de los motores, dada por las lecturas de pulsos de los encoders. Este sistema es subyacente del sistema de alto nivel.

El sistema de alto nivel se basa en la medida de la potencia generada por los paneles fotovoltaicos. Este sistema es el encargado de detectar en todo momento la posición óptima del posicionador para la máxima captación de potencia solar, optimizando así el seguimiento de la trayectoria solar.

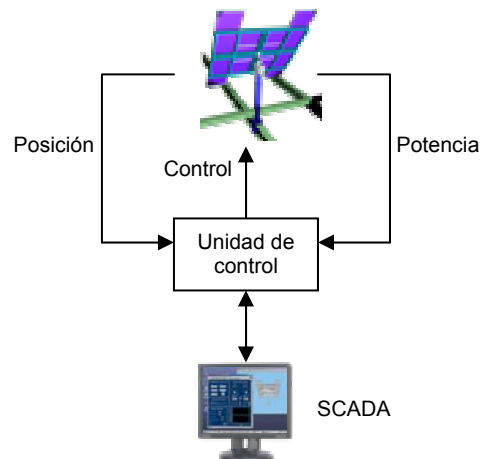


Figura 11: Estructura del sistema de control

Aunque no forma parte realmente del sistema de control, se dispone de un inversor de potencia, modelo *Sunny Boy 700*, que permite transformar la tensión continua generada por las placas a tensión alterna de 220 V y 50 Hz. A través del ondulator es posible alimentar a otros dispositivos o transferir la potencia transformada a la red eléctrica. Este dispositivo también puede proporcionar información sobre la conversión de potencia y el estado de la red a la que se conecta.

6 CONCLUSIONES

La unidad de control que hemos diseñado satisface plenamente las especificaciones básicas que

exigíamos al diseño inicial. Nuestro sistema es capaz de funcionar sin intervención humana, pudiendo reaccionar de forma autónoma ante posibles perturbaciones y fallos. Por otro lado, es posible programar fácilmente variadas técnicas de control en tiempo real, lo cual dota a la unidad de gran versatilidad.

Adicionalmente, hemos incorporado otras características de relevancia práctica. La facilidad de instalación de la unidad, así como sus dimensiones y consumo, confieren a nuestro dispositivo una gran portabilidad, pudiendo usarse en entornos muy variados. Por otro lado, los puertos de comunicaciones y los protocolos de comunicaciones implementados permiten integrarlo en otros sistemas más complejos.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la CICYT la financiación de este trabajo con cargo a los proyectos de investigación DPI2001-2424-C02-01 y DPI2000-1218-C0401.

Referencias

- [1] Z-World, Inc. Dynamic C 5.x Function Reference, P.N. 019-0002-03
- [2] Z-World, Inc. PK2100 User's Manual, P.N. 019-0014-02
- [3] Velter Querciali, PWM Power Supplies, Elsevier Health Sciences, ISBN 0444897909
- [4] David J. Ritter, Gary W. Johnson, LabVIEW GUI: Essential Techniques, McGraw Hill Professional, ISBN 0071364935