ES00 EO 398

MINISTERIO
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA

Ciemat Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

MASTER

El Helióstato Autónomo

G. García Navajas
A. Egea Gea

Informes Técnicos Ciemat

942
octubre, 2000

Informes Técnicos Ciemat

942
octubre, 2000

RECEIVED
NOV 13 2000
OSTI

El Helióstato Autónomo

G. García Navajas
A. Egea Gea

Plataforma Solar de Almería

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

Toda correspondenica en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesauro del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estdos Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Depósito Legal: M -14226-1995
ISSN: 1135 - 9420
NIPO: 238-00-002-0

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S14
HELIOSTATS; SOLAR EQUIPMENT; SOLAR TRACKING SYSTEMS; SOLAR ENERGY; CONTROL SYSTEMS; COMMUNICATIONS; RADIO EQUIPMENT; PHOTOVOLTAIC POWER SUPPLIES

El Helióstato Autónomo

García Navajas, G.; Egea Gea, A.

89 pp. 32 fig. 8 refs.

Resumen:

El CIEMAT, en sus instalaciones de la Plataforma Solar de Almería, PSA, ha desarrollado y puesto en funcionamiento el primer helióstato autónomo. Este helióstato introduce novedosos conceptos en un intento de reducir de forma significativa los costes de las infraestructuras en obra civil y distribución eléctrica en campos de helióstatos de centrales de torre central. Este helióstato de óptica fija y tipo vidrio/metal, de estructura clásica en T y de 70 m^2 de superficie reflectante, ha sido adaptado para incorporar todos los componentes necesarios bajo el nuevo concepto de autonomía. Un sistema fotovoltaico suministra la energía necesaria por el helióstato para controlar a dos motores de corriente continua a 24Vcc con un consumo máximo de 15A. El helióstato comunica con la sala de control, situada a unos 400 metros de distancia gracias al empleo de un radiomodem avanzado trabajando a 9600 baudios. Un anemómetro, un interruptor de viento, sensores de luz y temperatura han sido incorporados en el nuevo helióstato para dotarlo de rutinas de autoprotección ante condiciones externas adversas. Con el uso del panel fotovoltaico, instalado sobre la superficie especular del helióstato, y del radiomodem, se eliminan totalmente las canalizaciones y cableados empleados en campos de helióstatos convencionales. Una completa campaña de ensayos ha sido realizada para conocer el funcionamiento del helióstato en ciclos operativos rutinarios y determinar los consumos reales con objeto de optimizar el sobrecoste ocasionado por este concepto y poder contrastarlo con el ahorro obtenido en trabajos de obra civil, cableados y suministro eléctrico convencional.

The Stand-alone Heliostat

García Navajas, G.; Egea Gea, A.

89 pp. 32 fig. 8 refs.

Abstract:

The first Autonomous Heliostat has been developed by CIEMMAT at PSA facilities in Almería. This heliostat is an innovative approach to reducing the civil engineering work costs in heliostat fields of central tower plants. Channels, cables and other electric elements have been eliminated in the new heliostat. Thus, one 70-m^2, classical "T" glass/metal heliostat has been adapted to include all the new stand-alone concept components. A PV system is able to drive two sun-tracking DC motors between 5 and 24Vdc, 0 and 15A. The heliostat communicates with the control room 400-m away by using a radio-modem working at 9600 baud. An anemometer, a wind switcher, light and ambient temperature sensors have been installed on the heliostat for self-protection decision-making. A PV panel integrated into the heliostat reflecting surface, eliminates cabling and other elements required for a conventional power supply. Communication lines between master control and local control have been replaced by radio-modem. Testing has validated the technical feasibility of the prototype and quantified the real consumption and efficiencies of new elements. The extra costs produced by the autonomous concepts are compared with the cost of civil work in conventional heliostat field.

AGRADECIMIENTOS:

Deseamos especialmente agradecer a los Srs. Manuel Romero y Manuel Blanco por su apoyo decidido al desarrollo de estos nuevos conceptos así como al Sr. José Antonio Gázquez, profesor de la Universidad de Almería, por su inestimable contribución en el diseño del control local del helióstato principalmente en las radio-comunicaciones. Queremos agradecer también a todo el equipo de la Plataforma Solar de Almería por su ayuda en la concepción y materialización de las nuevas ideas expuestas en este documento.

INDICE:

1. Introducción

1.1. El concepto "Helióstato Autónomo"
1.2. Ventajas frente a campos convencionales

2. Descripción del primer helióstato autónomo

2.1. Elementos hardware

2.1.1. Tarjeta de control
2.1.2. Sistema de autoalimentación de energía
2.1.3. Control de motores
2.1.4. Circuitos de corte eléctrico
2.1.5. Radiomodem
2.1.6. Otros componentes

2.2. Elementos software

2.2.1. Características del software
2.2.2. Evaluación del comportamiento del Algoritmo de cálculo solar
2.2.3. Parametrización del control local
2.2.4. Estrategias operativas
2.2.5. Comunicación y protocolos

2.2.5.1. Comandos y mensajes
2.2.5.2. Identificadores de órdenes
2.2.5.3. Identificadores de petición de información y asignación
2.2.5.4. Estructura de los mensajes
2.2.5.5. Ejemplos de tramas
2.2.5.6. Información básica
2.2.5.7. Realización de ciclos diarios programados

2.2.6. Controles de mayor jerarquía.

3.- Evaluación

3.1. Medición de variables
3.2. Consumos reales
3.3. Rendimientos obtenidos
3.4. Sistemas de seguridad
3.5. Incremento de captación de energía
3.6. Diseño fotovoltaico optimizado
3.7. Radiomodem

4.- Costes
5.- Conclusiones
6.- Referencias

Indice de figuras:

1.1.- Campo de helióstatos convencional
2.1.- Vista frontal del helióstato autónomo
2.2.- Composición fotográfica del helióstato autónomo
2.3.- Diagrama general de bloques del helióstato autónomo
2.4.- Esquema de bloques de la tarjeta de control
2.5.- Tarjeta de control
2.6.- Esquema de conexionado del control local del helióstato autónomo
2.7.- Cargador de baterías
2.8.- Tarjeta servo de corriente continua
2.9.- Tarjeta del modem
2.10.- Diagrama de bloques del radiomodem
2.11.- Otros elementos del helióstato
2.12.- Instalación de codificadores en el helióstato
2.13.- Comportamiento del algoritmo híbrido en el microprocesador 80C32
2.14.- Topología en las comunicaciones de un campo de helióstatos autónomos
2.15.- Byte de estado
2.16.- Byte de evento
2.17.- Bytes de diagnóstico
2.18.- Byte de ciclo
2.19.- Sistema de Control Global de Planta, SCGP
3.1.- Sensores externos del helióstato autónomo
3.2.- Sistema de adquisición de datos
3.3.- Conexionado y montaje para la evaluación del helióstato autónomo
3.4.- Movimientos realizados por el helióstato durante el período de operación rutinaria
3.5.- Radiación global en superficie horizontal durante el período de operación rutinaria
3.6.- Velocidad de viento registrada el 19/09/99
3.7.- Consumos del helióstato durante un día claro y con operación rutinaria
3.8.- Consumos del helióstato durante un día nublado y ventoso
3.9.- Distribución de los consumos del helióstato en operación rutinaria
3.10.- Distribución de los consumos del helióstato en días inoperativos
3.11.- Curva de eficacia del cargador de baterías
4.1.- Planta COLON Solar (maqueta).

Indice de tablas:

2.1.- Características más importantes del helióstato autónomo

2.2.- Estadísticas de desviación del algoritmo Híbrido en su implementación estándar

2.3.- Estadísticas de desviación del algoritmo Híbrido en su implementación en 80C32

2.4.- Parámetros del helióstato autónomo

2.5.- Identificación de mensajes

2.6.- Cabecera del mensaje

2.7.- Cuerpo del mensaje, zona de parámetros

2.8.- Finalización del mensaje

2.9.- Ejemplos de tramas

2.10.- Códigos de estado en el helióstato autónomo

2.11.- Códigos del byte de eventos

2.12.- Códigos en los bytes de diagnóstico

2.13.- Códigos en el byte de realización de ciclos programados

3.1.- Variables medidas en el sistema de adquisición de datos

3.2.- Consumos diarios, días 4-27/09/1999

3.3.- Consumos en operación orto-ocaso, días 13-27/09/1999

3.4.- Consumos en períodos inoperativos, días 04-06 y 11/09/1999

3.5.- Eficacias de los servos

3.6.- Horas pico medias de sol

3.7.- Incremento de captación solar

3.8.- Márgenes de diseño fotovoltaico

3.9.- Energía acumulada en día nublado

4.1.- Costes asociados al concepto de helióstato autónomo

1. Introducción

Como novedad en el campo de la Energía Solar concentrada, técnicos del CIEMAT han desarrollado y puesto en funcionamiento, en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería, PSA, el primer Helióstato Autónomo.

El concepto de autonomía implica que este helióstato, equipado con un control local especialmente diseñado, podrá funcionar sin la asistencia de ningún otro dispositivo externo, 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. Podrá realizar sus funciones de forma aislada o, como será lo habitual, como componente de un campo de helióstatos en plantas de Torre Central.

Entendemos, como principal característica del helióstato autónomo, aquélla por la cual podrá ser instalado en cualquier lugar sin requerimientos de infraestructuras eléctricas, cableado y/o canalizaciones. Con el empleo de energía fotovoltaica para alimentar a cada helióstato y el empleo de las comunicaciones sin hilos, realizadas por radio en canales comerciales, el concepto de autonomía cobra su mayor significado introduciendo una novedad importante que puede ser aplicada con éxito en los campos de helióstatos de las futuras Plantas Solares de Torre Central en un intento, entre otros, de abaratar los costes de obra civil mediante la eliminación del entramado de canalizaciones y cableados de fuerza, señal y comunicaciones.

En el año 1995 fueron publicadas las primeras ideas en este sentido en el comité internacional de expertos SolarPaces[1], en un documento denominado "Technical Development of a new Stand-Alone Heliostat Field Control". Dicho documento, (García G., 1995), sentaba las bases para comenzar una nueva singladura que rompiera con el asentamiento de las ideas sobre control de helióstatos, aparecidas en los años 80.

Desde entonces técnicos del CIEMAT en la Plataforma Solar de Almería han trabajando ininterrumpidamente en este sentido. Ya en mayo de 1995 fue puesto en marcha un helióstato

[1] IES-Solar Power Chemical Energy Systems. TASK III Solar Technology and Aplications.

CASA de la planta de Almería CESA-1[2] bajo un nuevo control local comunicado a distancia por radio. Las experiencias recogidas de este primer intento hicieron posible el diseño y construcción de la placa electrónica, modelo GA2696A, concebida para la aplicación de los conceptos de autonomía en campos de colectores o helióstatos.

El helióstato GM100A[3], diseñado por el CIEMAT bajo el proyecto conjunto hispano-alemán de desarrollo de helióstatos de bajo costo (Monterreal R., 1997 y García G., 1996), fue puesto en funcionamiento con el nuevo control local en el mes de septiembre de 1996, empleando para ello una comunicación por radio de baja velocidad (1200 baudios).

Durante el año 1998 fueron diseñados expresamente los principales elementos del helióstato autónomo con la colaboración de la Universidad de Almería, gracias a un acuerdo específico firmado por ambas partes. El acuerdo incluía el diseño y construcción de una pareja de radio-modem de alta velocidad y elevadas prestaciones para ser empleados en campos de helióstato autónomos.

Otros elementos, tales como el cargador de baterías y los servos para el pilotaje de motores de corriente continua, fueron diseñados bajo la premisa de una alta eficacia y fiabilidad. Todo ello para, por fin, poder construir y poner en funcionamiento el primer helióstato totalmente autónomo conocido, en el mes de abril de 1999.

Desde entonces, hasta la fecha, este helióstato ha trabajado de forma ininterrumpida con objeto de estudiar su comportamiento durante largos ciclos de trabajo. Durante los meses de verano, y muy especialmente, durante el mes de septiembre de 1999, fue realizada una campaña de ensayos conducente a optimizar el funcionamiento y a validar los nuevos conceptos de autonomía. En el capítulo 3 se recogen y analizan los resultados obtenidos.

---

[2] La Central Electro Solar de Almería, CESA-1, inaugurada en 1983 en Tabernas, dispone de un campo de 300 helióstatos clásicos de 40m^2 de los tipos CASA y SENER (ver figura 1.1)
[2] Glass/Metal 100m^2 Heliostat, GM100A

1.1. El concepto "Helióstato Autónomo"

Los conceptos de autonomía introducidos en el nuevo helióstato son los siguientes:

- **Autonomía física:** La eliminación total de las canalizaciones y cableados eléctricos lo desligan de inflexibles condicionantes físicos.
- **Autonomía en el suministro eléctrico.** Una placa FV desliga al helióstato del suministro eléctrico convencional dotándole de una fuente segura de energía.
- **Autonomía de cálculo**: La determinación de la posición solar y el posicionado de ejes para realizar el seguimiento solar, con un control del rayo reflejado a cualquier punto espacial, lo desligan de una continua asistencia con un control de mayor jerarquía (control central).
- **Autonomía en su seguridad:** El conocimiento, en tiempo real, de las condiciones externas y la posibilidad de adoptar decisiones para su autoprotección ante averías o condiciones meteorológicas adversas, le permite su operación en aplicaciones totalmente aisladas.
- **Autonomía operativa:** Pudiendo realizar ciclos operativos preestablecidos o indicados a distancia desde cualquier lugar de forma periódica o automática.

El helióstato autónomo podrá ser instalado en cualquier lugar sin requerimientos de infraestructuras eléctricas, cableado y/o canalizaciones. Este concepto es importante a nuestro entender, ya que los costes de obra civil de campos de helióstatos de grandes dimensiones podrían minimizarse y reducirse a, únicamente, las propias cimentaciones de los equipos.

Con el empleo de energía fotovoltaica para alimentar a cada helióstato y el empleo de las comunicaciones sin hilos, realizadas por radiofrecuencia, el concepto de autonomía cobra su mayor significado. Para justificar el empleo de la energía fotovoltaica, diremos que:

- Debido a que los movimientos de los ejes requeridos por los helióstatos son muy lentos y de escaso valor en grados (normalmente menos de 360º), el consumo eléctrico diario de los elementos finales de movimiento será muy pequeño en contraste con los elevados pares o

momentos a vencer por los mismos y perfectamente asimilable por un pequeño sistema de captación de energía fotovoltaica.

- Se obtiene una fuente de tensión segura en cada helióstato equivalente al empleo de sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI), lo que da mayor seguridad a las instalaciones ya que se consigue una independencia del suministro eléctrico convencional y facilita la eliminación de medidas de redundancia.
- Se elimina la necesidad de tendidos y canalizaciones eléctricas, así como de elementos asociados en transformación, protección y distribución eléctrica.
- Las necesidades de consumo eléctrico están en relación directa con la producción ya que ésta se origina en el mismo momento del consumo. Esto permitirá minimizar las necesidades de almacenamiento eléctrico.
- Las placas fotovoltaicas, dependiendo de la aplicación en concreto, podrán beneficiarse total o parcialmente del seguimiento solar realizado por el helióstato, consiguiéndose por ello una mayor producción de electricidad. Esto facilitará un ajuste y optimización del coste del sistema solar fotovoltaico.
- La elección del emplazamiento de las placas fotovoltaicas sobre el helióstato deberá de permitir la captación de energía en condiciones inoperativas cuando, por motivos climáticos, avería u otra índole, el helióstato permanezca en posición de abatimiento (posición de reposo). En un helióstato tradicional con pedestal y facetas pasantes y cabezal en forma de "T", por ejemplo, la placa fotovoltaica podrá ser instalada, con una inclinación igual a la latitud del lugar, sobre el cabezal, aprovechado la apertura central superior, siendo definida la posición de abatimiento con las facetas (espejos) mirando hacia abajo y en orientación sur. En helióstatos donde no existe apertura central en la superficie reflectante, la posición idónea de la placa fotovoltaica será en el mismo plano de la superficie reflectante definiéndose la posición de abatimiento con facetas en posición vertical y orientación sur o facetas mirando al cielo. Estos emplazamientos asegurarán la captación de energía en un campo de helióstatos autónomos abatidos, incluso durante largas temporadas de inactividad, debido a averías o períodos de fuera de servicio de la planta solar.
- La integración de las placas fotovoltaicas en los helióstatos permitirá que los procedimientos de limpieza rutinarios de los espejos garanticen igualmente la limpieza de estas placas, consiguiéndose una mayor captación de energía fotovoltaica.

- Sería una original y novedosa manera de refundir dos tecnologías diferentes de la energía solar, las cuales se complementarían y tendrían mayor posibilidad de comercialización y lanzamiento que yendo separadas. Se conseguiría un mayor atractivo solar al desligar a los captadores solares (helióstatos) de los consumos eléctricos convencionales.
- La planta solar podrá beneficiarse de las subvenciones estatales y regionales aplicables por el uso de ambas tecnologías, la Solar Térmica y la Fotovoltaica.
- A todos los factores descritos anteriormente se deberá unir el ahorro energético originado por el aporte de energía producida por las placas fotovoltaicas, que tendrá que unirse a la aportación total de la planta solar. Esto se traducirá en una reducción de los consumos de energía internos de la planta, lo que provocará un aumento del rendimiento global de la instalación.

El concepto del empleo de placas fotovoltaicas obliga a trabajar con alimentación eléctrica en corriente continua y a optimizar los consumos eléctricos. Es por ello que será necesario:

- El empleo de motores de corriente continua (y/o otros elementos finales de movimiento) lo que nos permitirá la posibilidad de uso de varias velocidades en los motores de forma económica y sencilla, con rendimientos superiores a sus homólogos en corriente alterna.
- Conseguir grandes eficacias, superiores al 90%, en las unidades de potencia o servos.
- Los consumos de las placas electrónicas deberán reducirse al máximo, circunstancia actualmente conseguida con el empleo de CI's de bajo consumo en tecnología CMOS.
- Deberán de idearse procedimientos de ahorro energético de manera que puedan ser desconectados elementos no vitales, durante la noche o durante períodos de inactividad.
- Los codificadores ópticos deberán ser seleccionados atendiendo a un bajo consumo. Ya que, de cualquier manera, su consumo puede ser significativo, éste podrá ser minimizado desconectando los codificadores del suministro eléctrico durante la noche o en períodos de inactividad. Con este concepto aumentaremos significativamente la vida de los componentes ópticos de estos elementos, además de optimizar el consumo.
- El consumo directo de las tensiones entregadas por las placas fotovoltaicas facilitará la eliminación elementos de transformación eléctrica.

El empleo de alimentación en corriente continua aportará, indudablemente, una mayor seguridad para el operario que manipula el control local, ya que el nivel de las tensiones de trabajo será de bajo valor e inofensivo para la manipulación humana.

Cada helióstato de un campo dispondrá de un sistema completo de placa fotovoltaica, cargador y batería. El sistema, por su concepción, se diseñará con una baja autonomía siendo únicamente necesario cubrir los picos de consumo durante el funcionamiento de los motores, así como garantizar los consumos mínimos necesarios para mantener alimentados los circuitos electrónicos/eléctricos vitales durante períodos de larga inactividad, debido a condicionantes meteorológicos o de otra índole. Estos días de autonomía dependerán, claro está, de las condiciones climáticas de la zona en la que esté situada la planta solar pero, como será lo habitual, estas zonas dispondrán de una alta insolación anual. Debido a todo ello, la necesidad de almacenamiento eléctrico podrá reducirse de forma importante disminuyendo los costes de las baterías. A costa de esta reducción en el precio podrán ser empleadas pequeñas baterías de mayor calidad, vida y eficacia, así como podrán seleccionarse baterías más respetuosas con el medio ambiente, con mayores posibilidades de reciclado.

Otro elemento a incorporar en los nuevos controles locales autónomos de un campo de helióstatos, será la comunicación de los mismos con el control central, mediante una comunicación sin hilos, bajo los principios de las nuevas y recientes técnicas de comunicación.

Si, además de la energía fotovoltaica, se emplean comunicaciones sin hilos, conseguiremos:

- La eliminación total de las canalizaciones y tendidos de cables entre los diferentes helióstatos del campo solar, con lo que el ahorro en obra civil sería un factor importante a tener en cuenta.
- Empleo de nuevos y modernos medios de comunicación por radio con frecuencias en canales comerciales o por vía satélite.
- Posibilidad de pilotar y operar varias plantas solares desde un centro neurálgico situado a gran distancia.

- Una mayor inmunidad frente a descargas eléctricas debido a tormentas, ya que no hay soporte físico de unión entre los controles locales del campo solar.
- Las ampliaciones del campo solar serían inmediatas, sin interferencias operativas y sin problemas de dimensionado de las infraestructuras. Únicamente sería necesario el espacio físico y las cimentaciones de los nuevos helióstatos.

Para complementar el concepto de autonomía, el control local del helióstato autónomo ha de ser capaz de gestionar su propia seguridad y la de la planta solar. El control local deberá gestionar la integridad física del helióstato ante condiciones de emergencia o imponderables meteorológicos, así como por limitaciones impuestas en su operación.

Para ello y bajo petición de una aplicación concreta, podrá ser posible ponerlo en contacto con su entorno mediante sensores, así como dotarle de una lógica con objeto de que pueda adoptar decisiones de emergencia ante un evento o anormalidad grave como, por ejemplo, una intensa velocidad del viento, una muy baja tensión de batería, una muy alta temperatura ambiente, impactos por granizo, acumulación de nieve o agua, etc.

Otro concepto importante en la seguridad será dotar al control local, si así se solicita, de la decisión de desenfoque si éste detectase una pérdida de comunicación con el control central durante un tiempo establecido y convenido. Ello permitirá, por un tiempo, restablecer las condiciones normales de operación ante bloqueos o indisponibilidades momentáneas del control central, sin la adopción de medidas drásticas o dramáticas para otros sistemas del proceso.

Por último, y para complementar finalmente el concepto de autonomía, el control local deberá disponer de una completa autodiagnosis mediante la cual se informe al control central del origen y gravedad de la avería. Ante un fallo el control local intentará, si ello es posible y dependiendo del tipo de fallo detectado, la retirada del helióstato del foco instantes después de producirse el mismo. Transcurrido un tiempo para el intento, suficiente para haber desenfocado completamente, el control local quedará enclavado esperando su recuperación desde campo o desde el control central.

1.2. Ventajas frente a campos convencionales

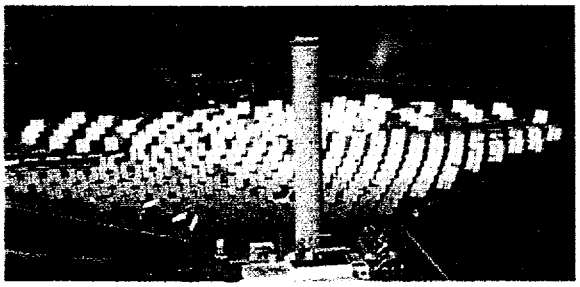

Figura 1.1. *Campo de helióstatos convencional*

Las ventajas que presenta un campo de helióstatos autónomos respecto a otro convencional son las siguientes:

- Un campo autónomo, al no depender de cableados ni de canalizaciones, permitirá una mayor libertad de posicionado dentro de los límites establecidos para el campo de helióstatos y una mayor flexibilidad en cuanto a ampliaciones futuras, eliminando la necesidad de previsión y sobredimensionado, tanto de las canalizaciones como de las instalaciones de distribución de baja tensión y protección eléctrica.
- Un campo autónomo presenta una mayor inmunidad a daños ocasionados por rayos y descargas eléctricas. En campos convencionales estos daños pueden generalizarse a un gran número de helióstatos al servir los cableados, tanto de fuerza como de comunicaciones, de conducción de las descargas.
- Los helióstatos con suministro tradicional quedan a expensas de cortes en su alimentación debido a interrupciones en el suministro o a disparos en las seguridades eléctricas, lo que provoca, en la mayoría de las situaciones, una pérdida en las referencias absolutas de la posición de los ejes de los helióstatos y obliga a un abatimiento generalizado del campo de helióstatos para un reencuentro de las mismas. Esta situación provoca una pérdida de producción de la planta solar, ya que el campo de helióstatos puede tardar cerca de una hora (como es el caso de los campos CESA-1, CRS[4] y SOLAR ONE[4]) en encontrar las referencias absolutas y volver a quedar operativo. Mediante un campo de helióstatos autónomos este problema queda solucionado ya que cada módulo tiene su alimentación garantizada disponiendo de una fuente de tensión segura e independiente de las demás.
- Bajo el empleo de un campo de helióstatos autónomos se elimina la necesidad del empleo de sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) para la solución al problema anterior.

[4] Central de Torre Central emplazada en Barstow- EEUU desde el año 1982 con una potencia de 10Mw y un campo de 1818 helióstatos tipo Martín Marieta de 40m^{2}cada uno. Central Receiver System, CRS, denomina a un pequeño campo de 93 helióstatos del mismo tipo instalados en la PSA, Almería.

- El empleo de campos de helióstatos autónomos elimina la necesidad del uso de codificadores absolutos (caso de los helióstatos MBB[5]) para la solución al problema anterior. Estos equipos son muchos más sofisticados con un coste sensiblemente mayor.
- Un campo de helióstatos autónomos, alimentados mediante energía fotovoltaica, permitirá una reducción de los consumos parásitos de la planta de producción, debiéndose considerar la producción fotovoltaica como un método para aumentar el rendimiento global de las instalaciones o como un aumento en la producción final de la planta. Un atractivo adicional es que la producción fotovoltaica se ve beneficiada por el seguimiento solar realizado por el helióstato y es producida en el mismo momento del consumo.
- Las tensiones empleadas en instalaciones convencionales entrañan un peligro para el personal de mantenimiento que manipula los controles de los helióstatos, por lo que se hace necesario el cumplimiento estricto de normas de seguridad y el empleo de material y equipos de protección personal. En un campo de helióstatos autónomos estos inconvenientes desaparecen ya que las tensiones usadas son de muy bajo valor y no entrañan ningún riesgo para las personas.
- El empleo de la radio para las comunicaciones de un campo de helióstatos autónomos posibilita la eliminación total de los cableados y las canalizaciones, por lo que, como ya hemos indicado, se descentraliza el riesgo de roturas ante rayos y descargas eléctricas (en los campos CESA-1 y CRS se han producido en varias ocasiones importantes daños causados por este motivo).
- El empleo de la radio en campos autónomos posibilita la operación a distancia de una o varias plantas situadas en una misma red. El gran desarrollo, durante estos últimos años, de las telecomunicaciones sin cables, garantiza la fiabilidad y rentabilidad de este concepto.
- El empleo de los conceptos de autonomía permite un mayor atractivo ya que los costes en obra civil y equipamiento eléctrico en baja tensión, para campos de helióstatos, se ven mermados muy significativamente.
- El empleo de los conceptos de autonomía en la determinación del posicionado de los helióstatos de un campo de grandes dimensiones elimina la necesidad de potentes ordenadores para el control central y de tramas de comunicación complejas (como es el

[5] Helióstato de la firma alemana Messerschmitt-Bolkow-Blöhm, MBB, año 1985, perteneciente al proyecto GAST

caso de los campos CESA-1, CRS y Solar One). Ello impide que un corte o deterioro de las comunicaciones pueda poner fuera de servicio, total o parcialmente, al campo de helióstatos con la consiguiente pérdida en la producción de la planta solar.

- La parametrización del helióstato autónomo permite una disminución importante de la longitud de los mensajes intercambiados entre control local y central. Ello permite una comunicación más ágil con tiempos de respuesta inferiores a los obtenidos en campos convencionales.
- Los conceptos de configuración paramétrica de un campo de helióstatos autónomos con motivos estratégicos, posibilitan mayores prestaciones operativas, de seguridad y de control que en campos convencionales.
- Con el traspaso de la responsabilidad funcional, operativa y de seguridad desde el control central hacia los controladores locales de los helióstatos se favorece el empleo de sistemas de control más amplios y evolucionados como son los controles globales de planta.
- El concepto de autonomía posibilita garantizar localmente, en cada helióstato o seguidor solar, la integridad y seguridad ante condiciones externas adversas, ya sea por viento intenso, falta de luz, acumulación de nieve o agua, impactos o temperatura.
- El concepto de autonomía amplía considerablemente el número de aplicaciones en seguidores solares, por ejemplo en pequeñas plantas de producción autónomas aisladas de red (plantas fotovoltaicas remotas), iluminación automática de zonas umbrías, etc. Aplicaciones remotas con gran dificultad de acceso son posibles bajo este concepto.
- También es posible, con este concepto de autonomía, la realización de operaciones cíclicas y repetitivas sin necesidad de comunicación continua, comunicación periódica o, incluso, sin ningún tipo de comunicación.

2. Descripción del primer helióstato autónomo

En el mes de Abril de 1999 ha sido puesto en marcha el primer helióstato bajo los conceptos de autonomía descritos con anterioridad. El helióstato COLON[6] (Silva M.,1999), es modificado para poder trabajar con la tensión continua, generada por una pequeña placa

[6] Proyecto de integración de energía solar térmica en una planta convencional de generación de energía eléctrica en C.T. Cristóbal Colón Grupo I por Sevillana de Electricidad S.A.

fotovoltaica y es comunicado por radio con la sala de control del proyecto CESA-1, situada a unos 400m de distancia, todo ello en el recinto de la Plataforma Solar de Almería. Para ello:

- Han sido sustituidos los motores por motorreductores de corriente continua a 24Vcc.
- Ha sido instalada, sobre el plano reflectante, una placa fotovoltaica comercial de 110Wp.
- Ha sido desarrollada una nueva tarjeta electrónica de potencia para el control de motores CC a varias velocidades y con alto rendimiento.
- Ha sido desarrollado un nuevo regulador de carga de baterías de alto rendimiento.
- Ha sido desarrollado un nuevo radiomodem de alta seguridad y velocidad.
- Ha sido implementada una rutina de cálculo del vector solar y refracción atmosférica mucho más actualizada y precisa que la utilizada por los anteriores helióstatos.

El helióstato queda trabajando, desde el día 30 de abril, de forma autónoma y rutinaria, desligado de las canalizaciones o cableados de fuerza y comunicaciones, con sus seguridades gestionadas por él mismo gracias a un pequeño sensor de viento dispuesto localmente en el helióstato, de un visor de luz (la propia placa fotovoltaica y un piranómetro) y de un sensor de temperatura.

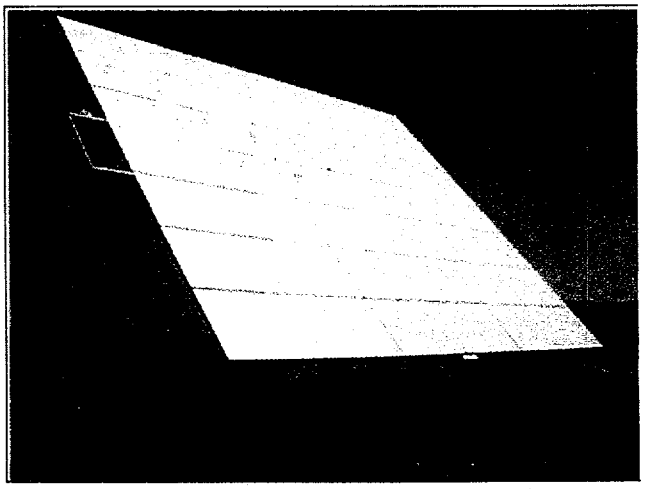

Figura 2.1. Vista frontal del Helióstato *autónomo*

➢	Espejo:	21 facetas con un total de $70m^2$
➢	Moto-reductor:	180W, 24Vdc, 9.8A, 590rpm
➢	Mecanismo ratio:	28000 / 1 acimut&elevación
➢	Velocidad ajes:	Alta: 7.5° min & Baja: 2.5° min
➢	Codificadores:	Tipo incremental 3600x4 (14400bits)
➢	Resolución angular:	0.025° en cada eje
➢	Panel fotovoltaico:	polySi, 24Vdc, 110Wp
➢	Batería:	ácido-plomo de 2x12Vdc, 55AH
➢	Radiomodem:	400-470Mhz, mensajes encriptados 9600baud, multi-frecuencia
➢	Sensor de viento:	Interruptor magnético especial
➢	Sensores adicionales:	Anemómetro, PT100, piranómetro
➢	Cálculo solar:	Algoritmo híbrido de la PSA (error<0.5min)

Tabla 2.1. *Características más importantes del helióstato autónomo*

La figura 2.1 muestra al helióstato autónomo en plena operación y la tabla 2.1 recoge un resumen de las características técnicas más importantes del mismo.

2.1. Elementos hardware

Se trata de un helióstato vidrio/metal clásico de óptica fija y 70m^2 de superficie reflectante con dos ejes de movimiento (giro acimutal y giro de elevación), manejado por un control local especialmente diseñado para poder pilotar dos motores de corriente continua, de 180W cada uno, para la realización del seguimiento solar, bien para un seguimiento normal al sol (para una mayor captación de energía fotovoltaica), bien para el control espacial del rayo reflejado y del foco (durante la operación normal en Plantas de Torre Central). La alimentación eléctrica del helióstato se realiza a 24Vcc mediante un panel fotovoltaico y una batería.

En la figura 2.2 se puede observar que la placa fotovoltaica (1) queda solidaria a la superficie reflectante y dispuesta en su mismo plano, en un lateral, y las baterías (2) quedan alojadas en el pedestal protegidas por la propia sombra del helióstato y por un pequeño tejadillo.

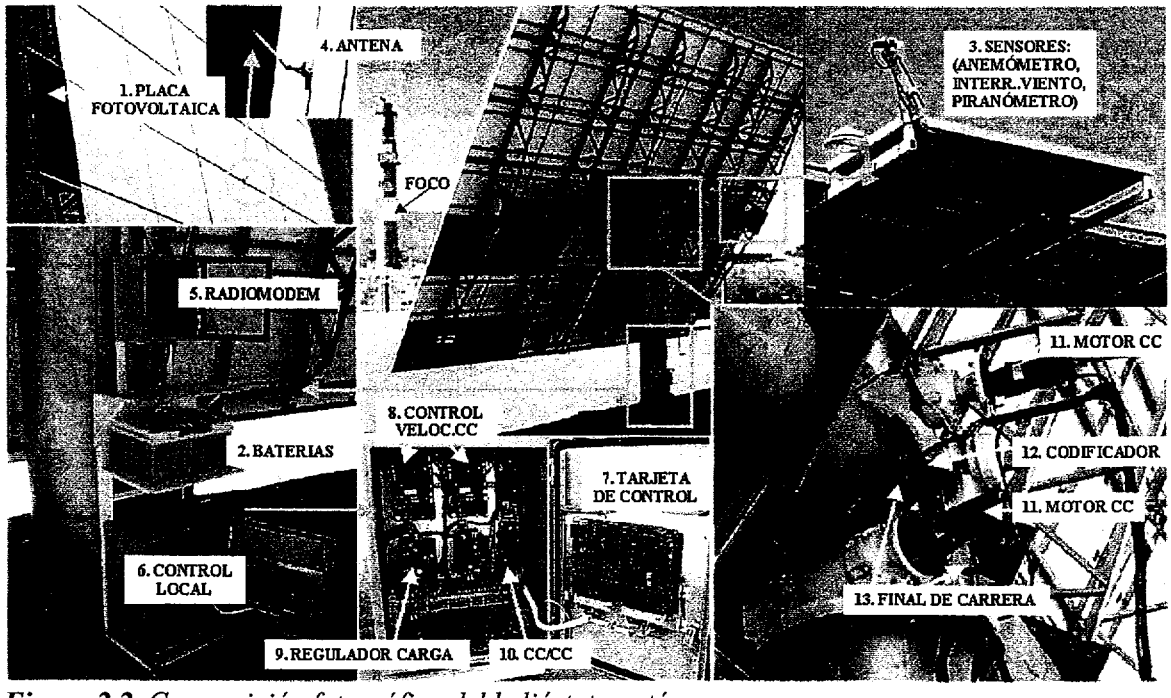

Figura 2.2. *Composición fotográfica del helióstato autónomo*

Con esta disposición la producción eléctrica de la placa se ve beneficiada por el seguimiento realizado durante la operación normal del helióstato en una Planta de Torre Central. Esta disposición garantiza el mantenimiento y limpieza de la misma ligando estas operaciones a las propias de la superficie reflectante. Con este emplazamiento se garantiza igualmente la captación de energía fotovoltaica durante los períodos inoperativos del helióstato (durante

períodos nocturnos, nublados o en caso de averías), ya que la posición de descanso se establece en la vertical hacia el sur y la posición de defensa (en caso de alto viento) en la posición horizontal hacia arriba.

Puede apreciarse el pequeño anemómetro e interruptor de viento (3) instalado sobre la placa fotovoltaica para la lectura de la incidencia del viento sobre el plano reflectante, con el objeto de la autoprotección y supervivencia ante valores extremos. Un piranómetro ha sido igualmente montado con objeto de obtener datos reales de radiación solar sobre el plano reflectante durante la campaña de ensayos.

Otro detalle que llama la atención en este helióstato es la pequeña antena (4) que ha sido instalada en el centro de la superficie reflectante y que permite, junto con el radiomodem (5), instalado dentro de una caja sobre el pedestal del helióstato, el enlace sin hilos con la sala de control situada en un edificio junto a la torre a unos 400m de distancia. A media altura de la citada torre puede apreciarse el foco del helióstato autónomo en plena operación.

El control local (6) del helióstato autónomo se instala en una caja metálica de intemperie, situada en la parte inferior del pedestal en donde se alojan las diferentes tarjetas electrónicas (7, 8, 9 y 10), que hacen posible el control del helióstato bajo los conceptos de autonomía indicados con anterioridad.

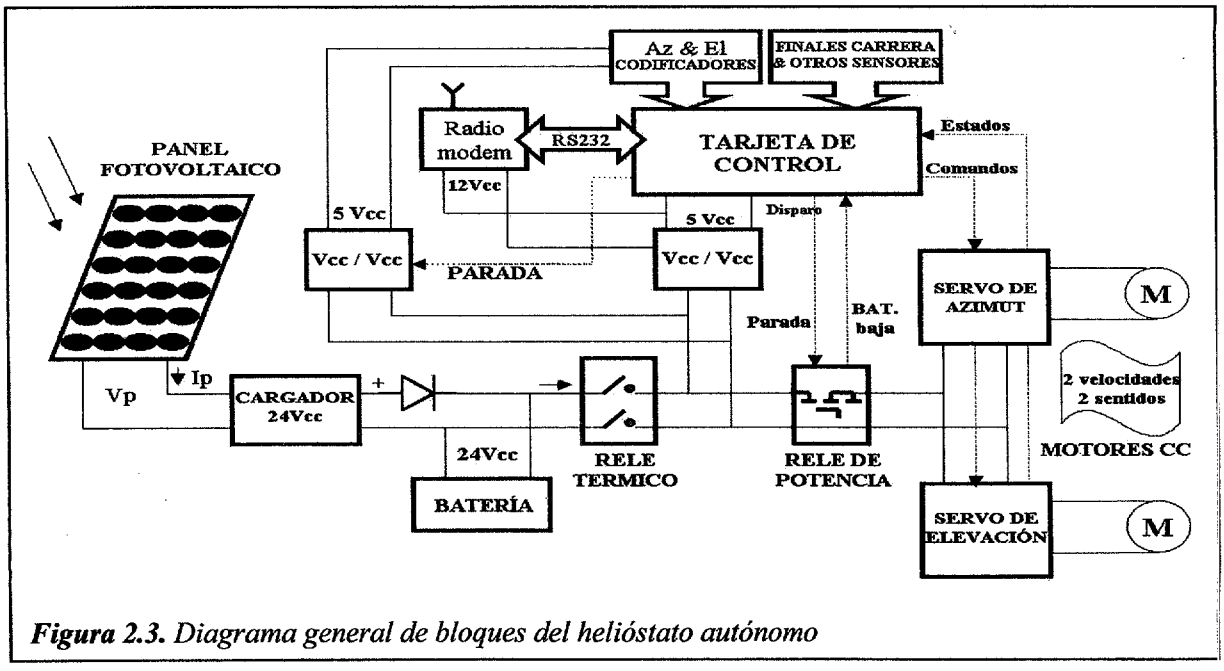

Figura 2.3. *Diagrama general de bloques del helióstato autónomo*

En el cabezal del helióstato se sitúan el resto de los elementos tradicionales, tales como motores (11), codificadores (12) y finales de carrera (13).

En la figura 2.3 se incluye un diagrama general de bloques del helióstato autónomo.

2.1.1 Tarjeta de control

Esta tarjeta electrónica forma parte del control local del helióstato y de ella depende la tarea de cálculo y control de los diferentes elementos del helióstato. La figura 2.4 muestra, conceptualmente, el diagrama de bloques y el conexionado entre esta tarjeta y los diferentes elementos del helióstato.

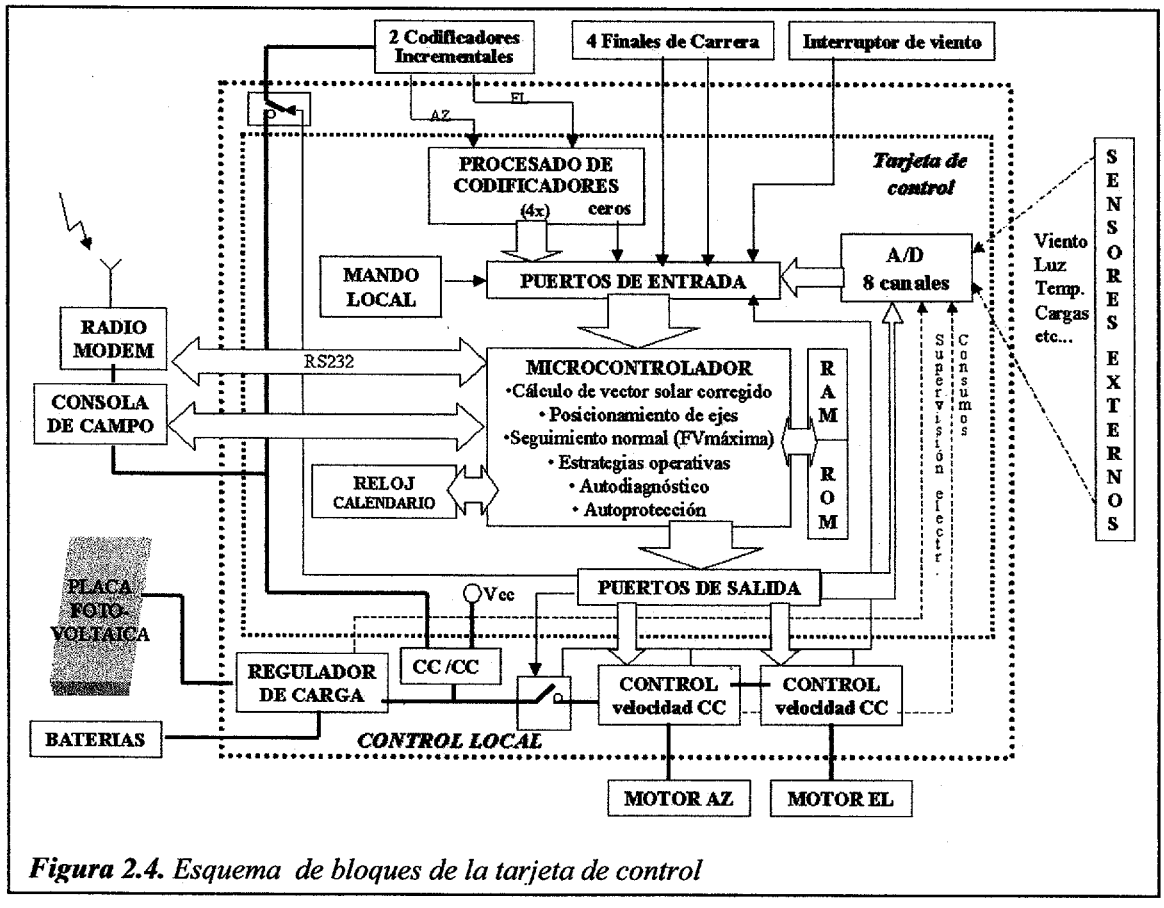

Figura 2.4. *Esquema de bloques de la tarjeta de control*

La tarjeta de control empleada en el helióstato autónomo es la tarjeta electrónica desarrollada por el CIEMAT para aplicaciones de seguimiento solar modelo GA2696A. Dicha tarjeta,

mostrada en la figura 2.5, incorpora el conocido microcontrolador de Intel, 80C32, el cual es el encargado de la realización de todas las tareas ya indicadas con anterioridad, ayudado por un reloj mantenido con batería, para el conocimiento preciso de la hora y del día, y por memorias del tipo RAM y EPROM.

El programa principal está contenido en una memoria EPROM, siendo válido para todos los helióstatos del campo solar. En otra memoria permanente de escritura/lectura es particularizado y parametrizado cada helióstato.

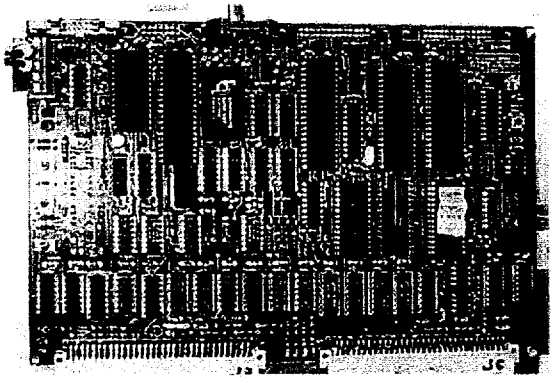

Figura 2.5. *Tarjeta de control GA2696A.*

El microprocesador es comunicado con el exterior mediante puertos de entrada/salida digital y mediante un convertidor Analógico/Digital pudiendo multiplexar hasta ocho canales diferenciales analógicos con una resolución de 12bits en el rango de los $\pm$10V. Estos canales analógicos son empleados para la lectura, en tiempo real, de variables externas/internas que requieren una supervisión con objeto de garantizar el correcto funcionamiento del equipo, así como de asegurar, en aplicaciones autónomas aisladas, la autoprotección ante condiciones atmosféricas extremas. Estos canales analógicos son también empleados para la lectura de los consumos de los elementos principales, así como de las variables eléctricas más representativas para un correcto autodiagnóstico del funcionamiento.

Un circuito electrónico especial es incorporado en la tarjeta de control para permitir la lectura de los pulsos A, B y Z, entregados por los dos codificadores incrementales, y su procesado hacia sendos buses paralelos de 16bits cada uno. En este proceso se produce una solución hardware para el contaje de los pulsos a alta velocidad y la determinación del sentido de giro, así como de la puesta a cero ante la presencia de las marcas de referencia absoluta (ceros) en los diferentes rangos de desfase eléctrico empleados comercialmente por la mayoría de los fabricantes de estos equipos. Este proceso consigue multiplicar por cuatro la resolución de los codificadores empleados al tener en cuenta los flancos de subida y bajada de los pulsos recibidos.

En esta aplicación son empleados codificadores incrementales estándares de 3600 pulsos por vuelta, lo que significa que después de este proceso se ofrecerán resoluciones de 14400 pasos en 360º, pudiéndose resolver 0.025º en cada eje del helióstato.

Los puertos de entrada digital permiten al microprocesador la lectura de los buses de contaje de los codificadores y pulsos de cero, así como de sensores externos tales como finales de carrera e interruptor de viento. Este último elemento, compuesto por un microinterruptor magnético, asegura un abatimiento de emergencia en condiciones de viento extremas.

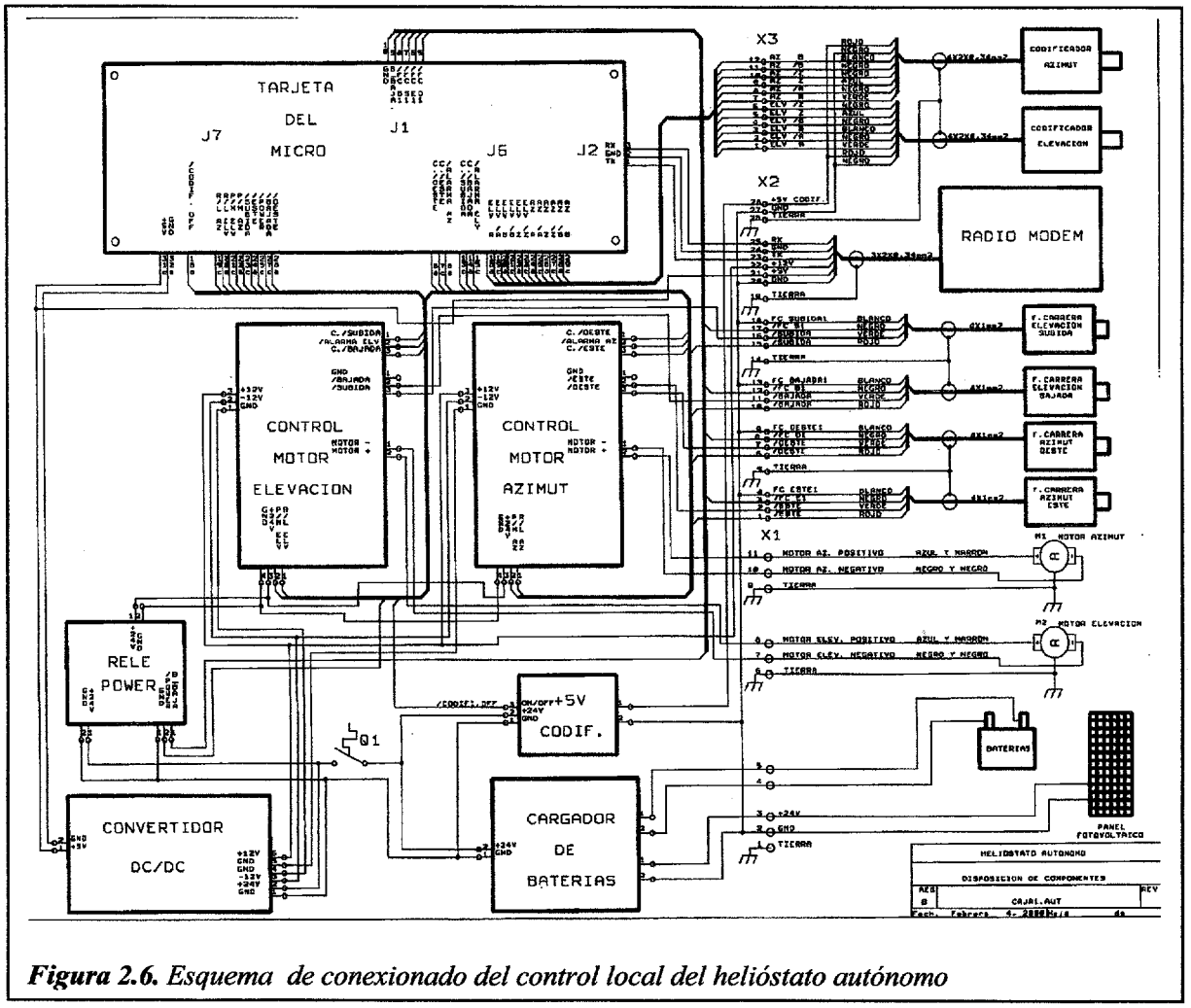

Figura 2.6. *Esquema de conexionado del control local del helióstato autónomo*

También son leídos los interruptores que forman el Mando Local y las señales de confirmación y de alarmas procedentes de otras tarjetas electrónicas. Los pequeños interruptores del Mando Local están instalados en la propia placa y permiten el movimiento, desde el propio helióstato, de los dos ejes del mismo en cualquiera de los sentidos de giro.

Los puertos de salida digital permiten al microcontrolador el control del multiplexor del conversor A/D, así como el pilotado de los elementos finales de movimiento (tarjetas de control de velocidad de motores de corriente continua) y la conexión/desconexión de alimentaciones eléctricas, con objeto de disminuir consumos durante períodos no operativos (por la noche, días nublados...) o para la autoprotección en caso de averías francas detectadas.

Las comunicaciones con el exterior se realizan mediante una línea serie asíncrona RS232C a una velocidad de 19200 baudios máximo. Esta línea es empleada para la conexión de un radiomodem que lo comunica con el control central situado a distancia. Esta línea también es empleada para la conexión de una consola de campo consistente en un ordenador PC portátil, desde el cual es posible la total manejabilidad y controlabilidad del helióstato. Esta consola es útil en trabajos realizados en campo por personal de mantenimiento.

Un sistema de vigilancia asegura el correcto funcionamiento del microcontrolador y del programa contenido en la EPROM el cual es ejecutado continuamente.

2.1.2 Sistema de autoalimentación de energía

Está compuesto por una placa fotovoltaica comercial de la firma ISOFOTON de silicio monocristalino modelo I-110 de 110Wp y 24Vcc, de dos baterías comerciales de la firma Hoppecke-Energy de ácido-plomo de 12V y 55Ah, de un regulador experimental para el control de la acumulación de energía eléctrica y de un convertidor comercial de corriente continua a corriente continua CC/CC.

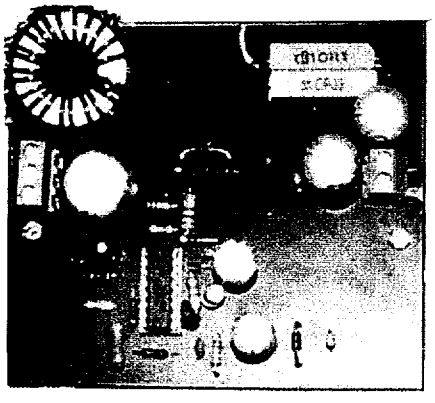

Figura 2.7. Cargador de baterías

El regulador de carga de baterías, situado en el interior del cuadro de control local, ha sido diseñado para esta aplicación empleando componentes electrónicos de conmutación y transistores MOS de potencia, con el fin de obtener un alto rendimiento en la conversión CC/CC y minimizar las pérdidas por calentamiento. La particularidad de este elemento es que trabaja como

un verdadero convertidor de potencia en corriente continua con un rendimiento en el entorno del 90%. Este concepto nos permite cargar la batería, en determinadas condiciones, a una intensidad mayor que la generada por el panel fotovoltaico cuando la tensión entregada por éste es muy superior a la de la batería. El aspecto físico de este dispositivo puede apreciarse en la figura 2.7.

Un convertidor CC/CC comercial ha sido empleado para convertir la tensión de 24Vcc entregada por la batería, en tensiones estabilizadas de 5Vcc y $\pm$12Vcc necesitadas por la electrónica del helióstato autónomo. Debido a las necesidades de optimización de los consumos del helióstato autónomo, este componente ha sido seleccionado por su alto rendimiento, mayor del 80%, originado por la modulación de anchura de pulsos, PWM, según especifica el fabricante. El convertidor empleado ha sido de la casa AMV Electrónica, modelo 24DBAB-CT2.

Una protección eléctrica magnetotérmica es empleada a la salida de las baterías.

2.1.3 Control de motores

Ha sido desarrollada una tarjeta electrónica de alta eficiencia para el control de motores de corriente continua en varias velocidades. Esta ha sido diseñada expresamente para su empleo en esta aplicación. El aspecto de la citada tarjeta puede observarse en la figura 2.8.

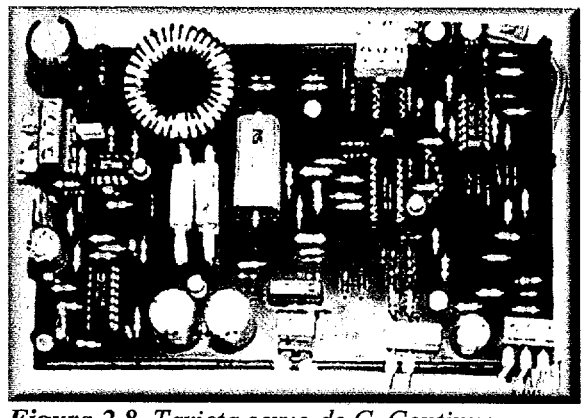

Figura 2.8. *Tarjeta servo de C. Continua*

Dos tarjetas de este tipo han sido instaladas en el interior del cuadro de control local para el manejo de los dos motores del helióstato autónomo.

Al igual que el regulador anteriormente descrito, estas tarjetas consiguen altos rendimientos (del orden del 90%) en la

transformación de la tensión entregada por la batería y las necesitadas por el motor en sus diferentes velocidades de operación (24 y 7 Vcc aproximadamente).

Estas tarjetas, basadas en un modulador PWM y un sistema driver "Power-Mos" tipo "*bootstrap*", son capaces de controlar motores de 24Vcc con un consumo máximo de 15A realizando el control de la velocidad y de cambio de sentido de giro. Para ello, cada tarjeta recibe órdenes desde el microcontrolador de la tarjeta de control, indicando la velocidad y el sentido de giro deseado, y retorna las confirmaciones de los movimientos realizados por el motor. Para una correcta información de estas confirmaciones, las tarjetas miden, en tiempo real, el consumo del motor determinando el sentido de giro y generando una señal de emergencia en el caso de una sobrecarga o anormalidad en el mismo.

2.1.4 Circuitos de corte eléctrico

Dos relés electrónicos son empleados para la conexión/desconexión de los consumos eléctricos de diferentes elementos del control local.

Uno de estos relés es empleado para la conexión/desconexión de la alimentación eléctrica a los codificadores ópticos del helióstato. Con el objeto de optimizar los consumos eléctricos, y dado que los codificadores presentan un consumo elevado en trabajo continuo, se opta por la desconexión de estos elementos por la noche o durante períodos inoperativos del helióstato, consiguiéndose un ahorro importante de energía y un aumento de la vida media de los elementos ópticos de los codificadores.

El otro relé es empleado para la conexión/desconexión de la potencia a motores. Esto nos permite la desconexión total de la potencia a motores en circunstancias de mal funcionamiento o avería registrada por la rutina de autodiagnóstico y autoprotección. Con esto, ante la presencia de una avería franca, aseguramos la total paralización del movimiento de los ejes del helióstato con el objeto de evitar alcanzar posiciones prohibidas en las que podrían producirse roturas mecánicas de mayor importancia. Otro uso de este relé, por motivos preventivos, es la desconexión de la potencia a motores en operaciones en donde ha de

asegurarse una inmovilización total del helióstato en procesos de mantenimiento, lavado o nocturnidad. En este circuito se incorpora la lectura continua de la tensión de batería generándose, mediante un comparador electrónico ajustable, una señal de emergencia para la información, al microcontrolador de la tarjeta de control, de una baja tensión en las baterías.

2.1.5 Radiomodem

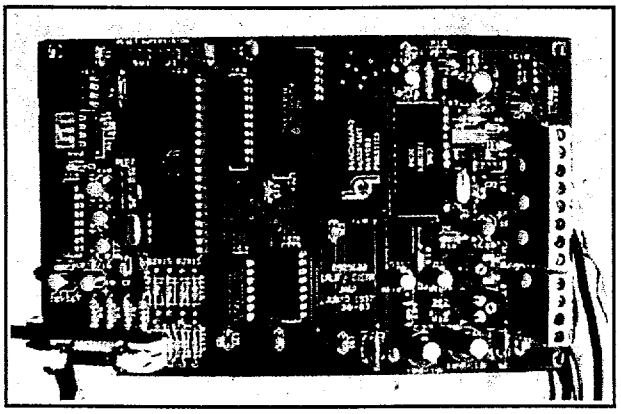

Figura 2.9. *Tarjeta del modem*

El radiomodem es un sistema de modem para radio de uso específico, que ha sido diseñado para la telemetría y el telecontrol del helióstato autónomo de esta aplicación (ver figura 2.9). Mediante el mismo se permitirá el gobierno de una planta de helióstatos de este tipo, sin el empleo de cables de interconexión para el flujo de datos intercambiados entre los helióstatos y la sala de control de la planta solar. Esto es posible mediante el uso de una comunicación semiduplex, con velocidades de transmisión de 9600 ó 4800 bits/segundo y canalización de radio en banda estrecha. La frecuencia de funcionamiento esta situada en la banda de 400 a 434 Mhz o en la banda 868 a 870 Mhz, normas nacionales: UN-29, UN-30 y UN-39 del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias.

La tarjeta electrónica RMOD9600 está basada en un modem integrado monolítico, de uso especifico para la transmisión de datos por radio denominado MFX919 de la firma CML. El circuito trabaja con modulaciones FSK pura a 4 niveles permitiendo una velocidad de 4800 a 19200 bits/s con una alimentación única de 5Vcc. La configuración y el control del modem integrado, así como de la unidad de radio, se realiza mediante un microcontrolador 87C52 de INTEL con el programa almacenado en memoria EPROM interna, realizando las funciones específicas de:

- supervisión del canal.

- control de la unidad de radio.
- detección de errores.
- encriptación y protección de la información.
- captación de comandos y envío de los mismos al helióstato.
- envío de los estados del helióstato a la estación de gobierno.

Para ello se necesitan de elementos auxiliares tales como los mostrados en el diagrama de bloques de la figura 2.10. Estos son:

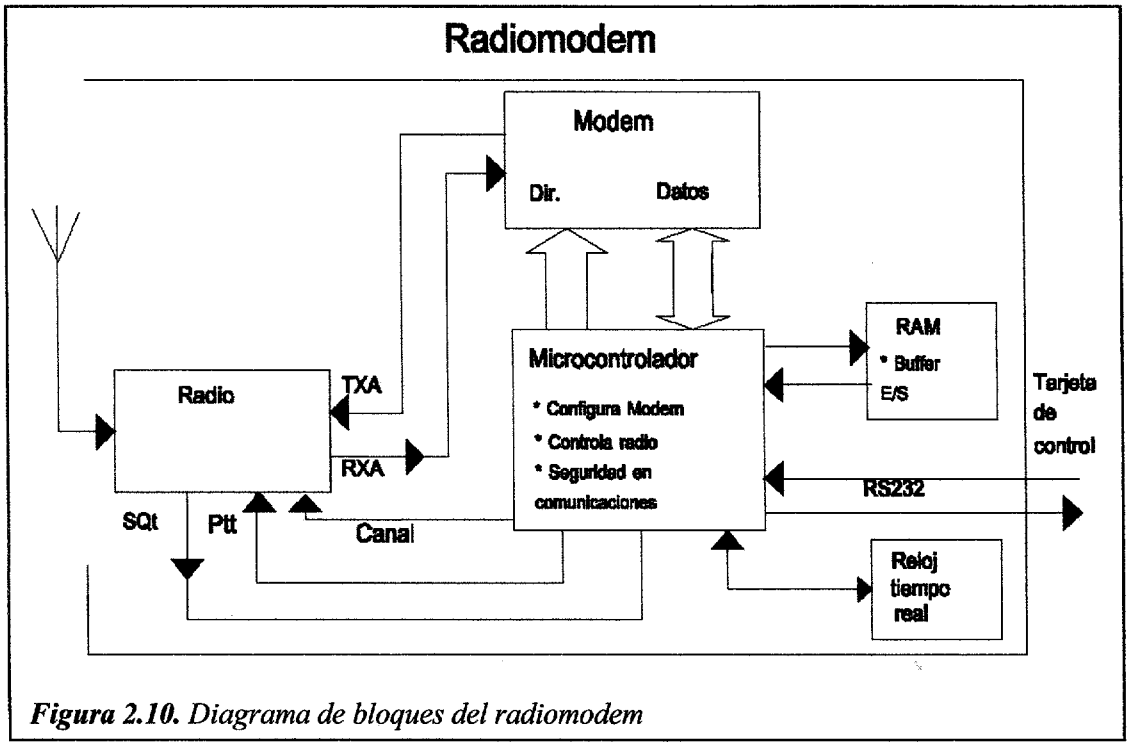

Figura 2.10. *Diagrama de bloques del radiomodem*

- Una RAM de 32 Kbytes permite el uso de un doble *Buffer* circular de entrada/salida para el almacenamiento temporal de la información en previsión de cortes temporales en el canal de radio.
- Un Reloj en tiempo real con cristal de cuarzo y batería de litio incluida, permite que el microcontrolador tenga información de tiempo, lo cual le confiere propiedades de encriptar datos con códigos dependientes del tiempo. Con esta posibilidad se consigue gran inmunidad al intrusismo alcanzándose una gran seguridad en las transmisiones.

- Un *Reset* guardián integrado anula la posibilidad de bloqueo del sistema "Radiomodem" por entrada de estados falsos en su programa, lo cual le confiere inmunidad frente a parásitos que pudieran alterar datos en su memoria RAM.

Durante la puesta en marcha, el microcontrolador configura el modo y velocidad de transmisión del modem integrado, así como el canal de radio seleccionado; después se ejecuta el programa de control de comunicaciones, que funciona en modo interrupciones-periférico, actuando como periféricos el puerto serie RS232C, conectado al control local del helióstato, y el modem integrado.

Durante el funcionamiento normal, el modem integrado provoca una interrupción al microcontrolador, cada vez que se reciben datos por el canal seleccionado, lo que provoca una lectura de la trama recibida. En el análisis de los datos de cabecera de la trama, se determina la identidad del destino de los datos, desestimándose el mensaje si no hay coincidencia con la identidad del helióstato o si éste ha sido alterado durante su transmisión. Admitida la trama, ésta es desencriptada, filtrada y trasmitida por el puerto serie a la tarjeta de control del helióstato.

Si la interrupción es provocada por el puerto serie, los datos de la tarjeta de control deben de ser transmitidos hacia el control central. En este caso los datos son previamente encriptados, modulados y transmitidos finalmente, cuando el canal de transmisión esta libre. En caso de que el canal de radio esté ocupado, los datos permanecen almacenados en un Buffer E/S para una transmisión posterior.

2.1.6 Otros componentes

El helióstato autónomo ha sido equipado con dos motorreductores de imán permanente para corriente continua, de la firma BAUER, modelo BG05-31/P05LA32, de 180W de potencia cada uno. Dichos motorreductores, alimentados a una tensión de 24Vcc, aportan

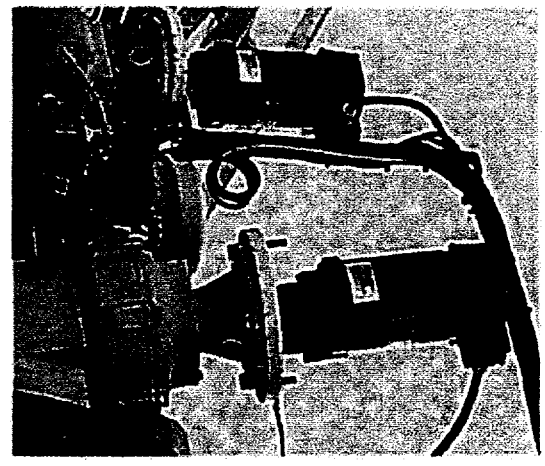

Figura 2.11. *Otros elementos del helióstato*

una velocidad, en el eje de salida, de 590rpm bajo un par nominal de 2.9Nm, consumiendo para ello 9.8A.

Esta velocidad de salida ha sido cuidadosamente seleccionada para la obtención de velocidades óptimas de operación en los ejes del helióstato cuando los motores son alimentados a su tensión nominal de 24Vcc. Considerando que la reducción mecánica del mecanismo del helióstato autónomo es de 28000/1, la velocidad nominal en cada eje será de 7.5 grados por minuto, lo que significa que el helióstato necesitará algo más de 25 minutos para efectuar, en el eje de acimut, el recorrido completo comprendido entre las posiciones extremas permitidas por los finales de carrera (unos 200º). El recorrido máximo permitido en el eje de elevación será realizado en unos 12 minutos solamente (unos 95º).

Para conseguir un seguimiento solar preciso son necesarias velocidades inferiores a las indicadas anteriormente. Para ello, los motores son alimentados a una tensión tres veces y media inferior al valor nominal. Con ello se consiguen velocidades finales en cada eje de unos 2.5 grados por minuto cuando el helióstato está realizando seguimiento solar.

Con esta velocidad se consigue una gran estabilidad, en condiciones normales de funcionamiento, en el seguimiento a foco, obteniéndose la máxima resolución posible establecida por el codificador empleado en 0.025º.

Otros elementos importantes del helióstato autónomo son los codificadores ópticos. En esta aplicación han sido empleados dos generadores de impulsos rotativos de tipo incremental de la firma HEIDENHAIN modelo estándar industrial ROD426.000B-3600 i/v KF, junto con los acoplamientos del modelo K17. Dichos codificadores, alimentados a 5Vcc, generan los pulsos estándar A, B y Z en señal TTL ofreciendo una protección IP64.

La resolución angular de estos elementos es de 3600 pasos por vuelta lo que se convierte, después de un proceso especial en la tarjeta de control del helióstato, a un valor cuatro veces superior establecido en 14400 bits. Esto permite discriminar posiciones angulares de 0.025º.

La instalación de estos codificadores en el mecanismo del helióstato COLON ha sido realizada como muestra la figura 2.12.

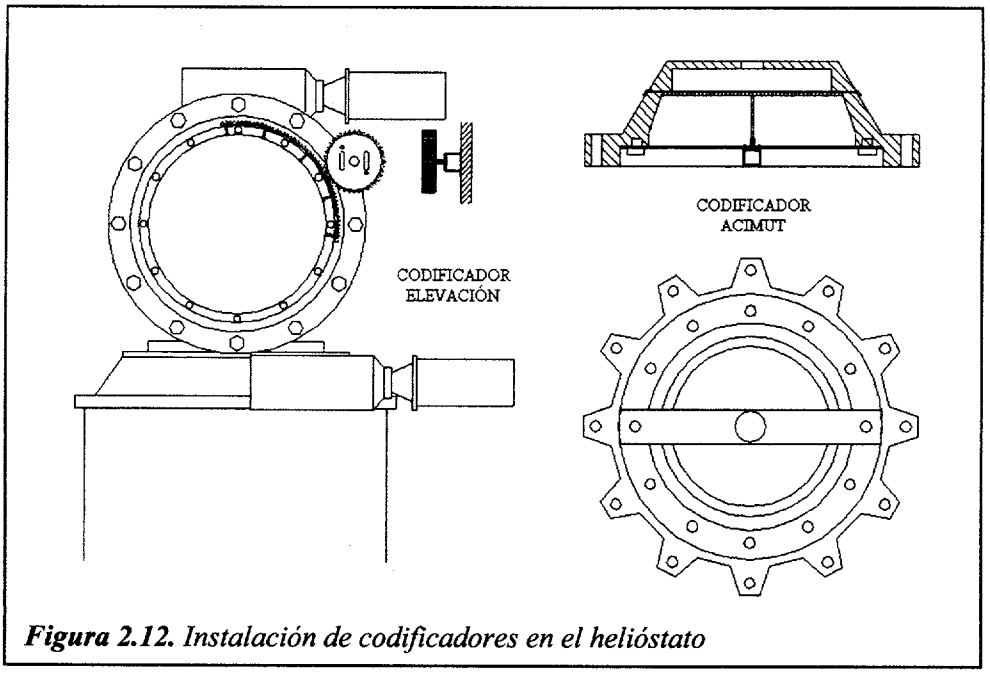

Figura 2.12. *Instalación de codificadores en el helióstato*

Para el acoplamiento del codificador en el eje de elevación del helióstato, ha sido necesario el empleo de un cuarto de corona y un doble piñón. La corona ha sido soldada sobre la brida de unión entre el cabezal y el tubo soporte. La relación mecánica de este engranaje es de 3.26 lo que nos indica que una vuelta completa del eje de elevación supone 46944 bits del codificador (14400 * 3.26). Esta circunstancia hace que la resolución angular final en el eje de elevación del helióstato autónomo sea de 0.0077°. Para evitar holguras en los dientes de este engranaje, ha sido instalado un doble piñón unido mediante un resorte que asegura un contacto firme de cada piñón en ambas caras del diente de la corona.

El codificador de acimut ha sido montado mediante una pletina atornillada a la brida de manera que los ejes mantienen una relación mecánica igual a la unidad.

Para acotar los movimientos del helióstato e impedir que éste alcance posiciones prohibidas en las que pudieran producirse choques con obstáculos conocidos o averías mecánicas, son empleados cuatro finales de carrera, dos por eje, de la marca SCHMERSAL modelo TK015-11yue-1108. Estos finales de carrera disponen de un doble contacto desfasado. Uno de los contactos, el activado en primer lugar, es empleado para informar al microcontrolador de la

tarjeta de control del helióstato, mientras que el otro actúa directamente sobre la lógica de comando de los motores para asegurar una parada inmediata de los mismos.

2.2 Elementos software

2.2.1 Características del software

El software ha sido realizado en lenguaje C y compilado con el compilador C51 de Keil. La depuración y prueba del software ha sido realizada empleando la tarjeta emuladora NOHAU Emul51-PC/E128-16 con el POD C31S-16. Las depuraciones finales del software fueron efectuadas durante pruebas reales de funcionamiento en el propio helióstato.

El software, transformado a código máquina, queda alojado en una memoria EPROM de 64Kb. Esta memoria será idéntica para cada helióstato de un campo y podrá ser intercambiada entre ellos.

Los parámetros particulares de cada helióstato quedan alojados en una pequeña memoria RAM situada en el reloj en tiempo real alimentado continuamente por una pequeña batería. Los relojes, por tanto, no podrán ser intercambiados entre helióstatos.

Las funciones que incorpora este software son:

- Manejo de interrupciones y comunicaciones serie.
- Manejo de reloj en tiempo real y configuración de chips.
- Rutina de lectura de puertos: I/O y codificadores.
- Rutina de multiplexado y lecturas de canales analógicos.
- Rutinas de cálculo tales como:
    - Angulo cenital y ángulo acimutal del sol mediante el empleo del algoritmo híbrido desarrollado en la PSA
    - Corrección por paralaje

- Corrección por refracción atmosférica con lectura en tiempo real de la temperatura ambiente.
- Corrección dinámica del centro óptico del helióstato
- Posicionado de ejes para control del rayo reflejado

- Rutina de posicionado a velocidad nominal (rápida)
- Rutina de aproximación a consigna en velocidad lenta
- Rutina de búsqueda de referencias absolutas (ceros)
- Rutinas de gestión para la propia seguridad (abatimientos automáticos en caso de avería, muy alto viento o muy baja tensión en batería)
- Rutinas de gestión para la seguridad de personas y demás elementos de la planta solar (pasillos de seguridad, desenfoques automáticos, *timeout*,...)
- Rutinas de ahorro energético (letargo)
- Rutina para la realización de ciclos programados
- Tratamiento de fallos y autodiagnóstico
- Tratamiento de parámetros de configuración del helióstato (identificación, *offsets*, etc...)
- Proceso de detección de tramas correctas
- Tratamiento de órdenes recibidas
- Comunicación de los estados solicitados

Tal y como quedan estructurados los tiempos, este software analiza:

64 veces por segundo:

- Análisis de las tramas recibidas por la línea de comunicaciones, proceso de las mismas y contestación, si procede, de estados y mensajes solicitados.
- Búsqueda de referencias absolutas (ceros).
- Multiplexado analógico y lectura de canal.

8 veces por segundo:

- Lectura de codificadores y determinación de la posición de los ejes.
- Rutina de posicionado y ataque a motores.
- Lectura señales digitales I/O y analógicas
- Gestión de finales de carrera y limitación del movimiento
- Análisis de estados y fallos (diagnósticos).

Cada segundo (aprox.):

- Asimilación de órdenes recibidas desde el control central.

Cada 3 segundos:

- Cálculos solares, correcciones por refracción y geometría del eje óptico.
- Calculo de nuevas consignas de acimut y elevación.
- Gestión de pasillos de seguridad.
- Gestión de ciclos programados.

Una vez cada día:

- Inicialización y asignación del nuevo día.

2.2.2. Evaluación del comportamiento del algoritmo de cálculo solar

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la evaluación del comportamiento del Algoritmo Híbrido, versión 2.1, en su implementación en el microprocesador Intel 80C32, el cual se emplea en el control local utilizado en el helióstato autónomo.

Se presentan tablas que nos permiten comparar las estadísticas obtenidas con la implementación estándar (compiladores de Microsoft y Borland) y la implementación para el compilador C51, utilizado en la generación del ejecutable que corre sobre el microprocesador antes citado. Ambas estadísticas están referenciadas al patrón de cálculo que nos ofrece el programa MICA[7] el cual nos permite calcular las coordenadas horizontales del Sol con una incertidumbre máxima de 0.5 segundos de arco, para el período comprendido entre el año 1990 y el 2005, ambos inclusive.

Para llevar a cabo la evaluación se han calculado los valores de distancia cenital y acimut solar para el período comprendido entre las 0 h del 1 de Enero de 1999 y las 24 h del 31 de Diciembre del 2005, con un paso temporal de 20 minutos, lo que equivale a un total de 184.104 registros. Las coordenadas geográficas utilizadas han sido las de la Plataforma Solar de Almería (Lat. 37.100433° N, Long. 2.359912° W).

Los resultados se han obtenido mediante la utilización del emulador de NOHAU anteriormente especificado, que simula el comportamiento del microprocesador y que nos ha permitido obtener los ficheros de salida para la presente evaluación.

En las tablas 2.2 y 2.3 podemos observar las estadísticas de la implementación estándar y la implementación para el compilador C51. Comparando las mismas se observa el efecto que produce el hecho de que el único tipo de números reales que reconoce el compilador C51 es el tipo *float* (4 bytes), mientras que en la implantación original del algoritmo Híbrido se utiliza el tipo *double* (8 bytes).

Tabla 2.2: *Estadísticas de desviación del algoritmo Híbrido en su implementación estándar*

(en minutos de arco)	**Desv. Dist. Cenital**	**Desv. Acimut Solar**	**Desv. Vector Solar**
Media Muestral	-0.0108	0.0966	0.1604
Desviación Estándar	0.1237	0.1946	0.0953
Desviación Media	0.0983	0.1344	0.0777
Recorrido	[-0.4246 0.3668]	[-1.3646 1.7475]	[0.0003 0.4707]

[7] MICA, *Multiyear Interactive Computer Almanac,* elaborado por el Observatorio Astronómico de la Marina de los Estados Unidos.

Tabla 2.3: Estadísticas de desviación del algoritmo Híbrido en su implementación en 80C32			
(en minutos de arco)	**Desv. Dist. Cenital**	**Desv. Acimut Solar**	**Desv. Vector Solar**
Media Muestral	-0.0113	0.0963	0.1606
Desviación Estándar	0.1238	0.1952	0.0955
Desviación Media	0.0983	0.1348	0.0779
Recorrido	[-0.4322 0.3686]	[-1.3538 1.7523]	[0.0003 0.4843]

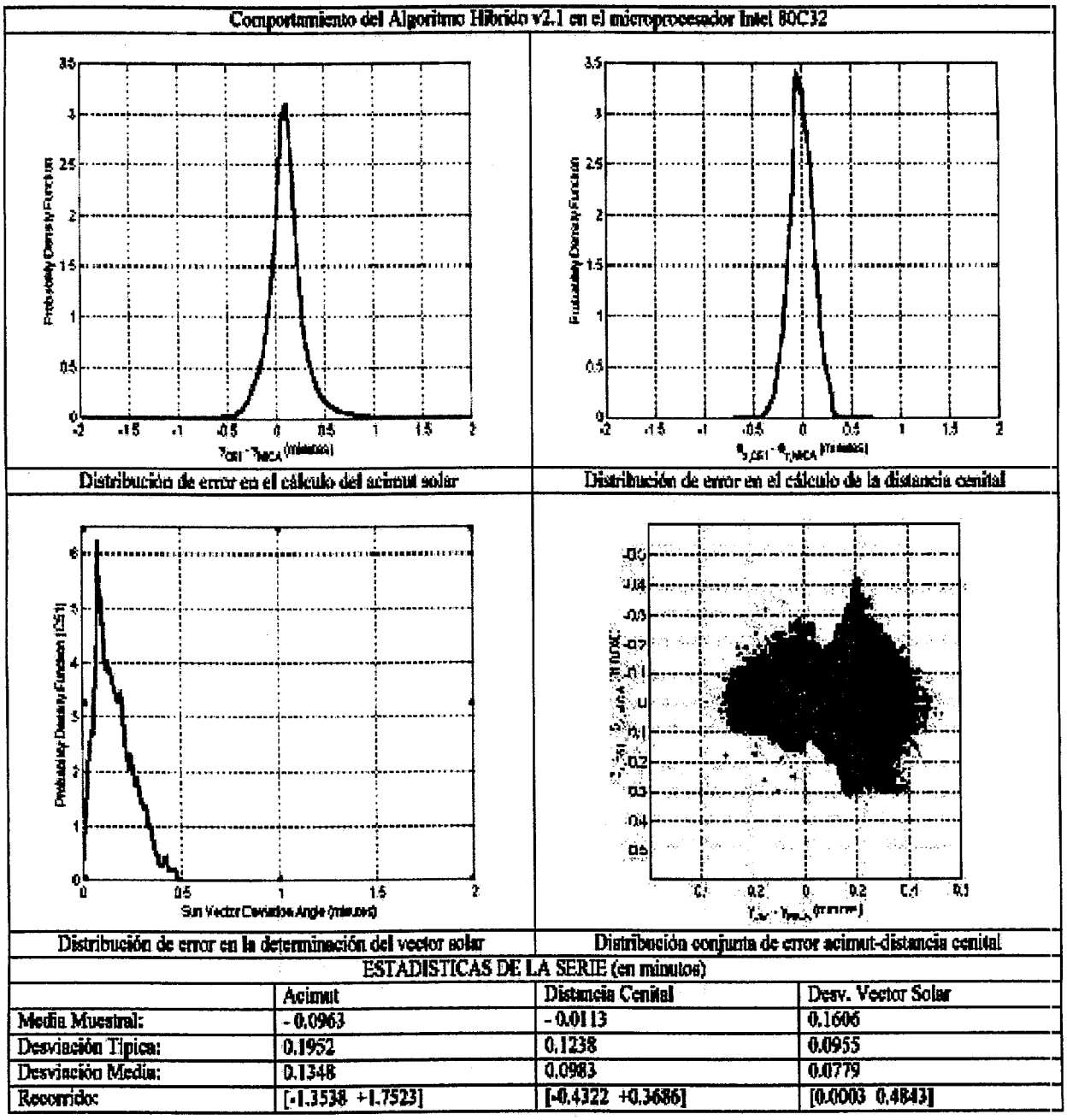

Figura 2.13. Comportamiento del algoritmo híbrido en el microcontrolador 80C32

El empeoramiento que se produce, debido a la pérdida de precisión en las operaciones realizadas con el microprocesador, es muy leve. De hecho, se intentó plasmar dicha diferencia de una manera gráfica, pero al final se tuvo que desistir debido a la casi total coincidencia de las mismas. La figura 2.13 recoge de manera gráfica el comportamiento del algoritmo empleado.

Este hecho confirma que las prestaciones de cálculo matemático ofrecidas por el microcontrolador de uso general de 8 bits, 80C32, son más que suficientes para asegurar la precisión entregada por el algoritmo empleado.

2.2.3. Parametrización del control local

La parametrización del helióstato permitirá, sin modificar el software de la aplicación, definir y modificar lo siguiente:

- Adaptar las condiciones propias, constructivas, geométricas y de diseño del helióstato (resolución de posicionado y de seguimiento a foco, posiciones geográficas, márgenes y límites de movimiento,...).
- Definir parámetros operativos del helióstato (identificación, ajuste, offsets, parámetros de apunte,...).
- Definir las posiciones fijas (abatimiento, lavado,...) y coordenadas de foco (foco principal, focos secundarios, focos de emergencia y de seguimiento desfasado,...) más significativas.
- Definir pasillos de seguridad.
- Definir condiciones y/o actuaciones de emergencia
- Definir la realización de ciclos automáticos.

En la tabla 2.4 se recogen todos los parámetros del helióstato autónomo.

Los parámetros globales no podrán ser reconfigurados y estarán indicados dentro del código del microcontrolador de cada control local. Estos parámetros, por su propia concepción,

permanecerán invariables a lo largo de la vida de la planta. Así, las coordenadas geográficas corresponderán a las referenciadas en el centro de la torre de la planta solar y las geométricas corresponderán a valores dimensionales e invariables del helióstato.

Los demás parámetros que se describen a continuación estarán contenidos en una memoria no volátil existente en cada helióstato y podrán consultarse y modificarse a voluntad.

Los parámetros de ajuste y configuración determinan los ajustes básicos del helióstato para determinar la posición absoluta real de sus ejes (ajuste de ejes), las correcciones del cálculo para un correcto apunte (*offsets*), las bandas y afinado en el seguimiento y su identificación dentro del campo.

Tabla 2.4. *Parámetros del helióstato autónomo*

PARÁMETROS GLOBALES								
Coordenadas geográficas		**Coordenadas geométricas (mm)**						
Latitud	**Longitud**	**Altura**		**Desplaz eje**		**Brazo**	**Giro espejo**	
37.099893	-2.3598219	4152		0		565	0	
AJUSTES Y CONFIGURACIÓN								
C **Ajustes ejes**		**O** **Offset**		**I** **Configuración**				
Eje_az	**Eje_el**	**Off_az**	**Off_el**	**Ngrup**	**Nhel**	**Bit_az**	**Bit_el**	**Bit_aprox**
0	0	9	-4	1	1	1	1	10
PUNTOS SIGNIFICATIVOS (bits)								
P[0] **Abatimiento**		**P[1]** **Posición de defensa**		**P[2]** **Lavado**		**P[3]** **Mantenimiento**		
Az	**El**	**Az**	**El**	**Az**	**El**	**Az**	**El**	
200	3400	3600	3400	500	500	2000	10000	
FOCOS SIGNIFICATIVOS (mm)								
F[0] **Blanco emergencia**			**F[1]** **Blanco 1 pasillo seg.**			**F[2]** **Blanco 2 pasillo seg.**		
X	**Y**	**Z**	**X**	**Y**	**Z**	**X**	**Y**	**Z**
2000	1700	75000	100000	0	-10000	100000	0	30000
F[3] **Blanco 3 pasillo seg**			**F[4]** **Seguimiento desfasado**			**F[5]** **Seguimiento normal**		
X	**Y**	**Z**	**X**	**Y**	**Z**	**X**	**Y**	**Z**
50000	0	50000	20000	6700	75000	0	6524	34165
OTROS								
G **Coordenadas topográficas**			**S** **Supervivencia**					
X	**Y**	**Z**	**Viento**	**ciclos**	**Adq**	**Tout**	**estado**	**Adelanto**
21809	383651	5998	24	0	240	0	0-16	1 o 2

Las matrices incluidas en el control local tienen, como finalidad, predefinir los valores de aquellas posiciones o situaciones que tienen cierta significación y que serán empleadas frecuentemente durante la operación rutinaria o durante la realización de una campaña de ensayos. Aunque la dimensión de estas matrices puede ampliarse hasta 10 elementos, se definen a continuación los elementos mínimos necesarios, establecidos en cuatro para puntos significativos y seis para coordenadas de enfoque.

Los puntos significativos se definen como posiciones absolutas (posición estática) de los ejes del helióstato con significado propio. Sirvan de ejemplo las siguientes posiciones: abatimiento, defensa, lavado, mantenimiento... Estas posiciones están definidas en bits lo que equivale, en el helióstato autónomo, a 14400 bits en 360º. El control local puede almacenar 4 puntos significativos, quedando definido cada punto por un índice de valor entre 0 y 3. El elemento 0 de esta matriz queda asignado a la posición de abatimiento del helióstato y el elemento 1 define la posición de defensa en la cual deberá permanecer el helióstato en condiciones de alta velocidad de viento o fallo franco detectado. Los elementos siguientes quedan a la disposición del operador, el cual podrá usarlos y asignarlos a posiciones significativas desde el punto de vista operativo, tales como posición de lavado o posición de mantenimiento.

Los enfoques significativos se definen como coordenadas en milímetros X, Y, Z de blancos conocidos establecidos dentro o fuera del receptor solar (posición dinámica). Estas coordenadas están referidas a un sistema de coordenadas cuyo punto de origen está situado en el centro de la torre de la planta solar, de forma que el eje X es positivo hacia el este, el eje Y es positivo hacia el norte y el eje Z es positivo en altura con la vertical.

El control local puede almacenar un total de 6 enfoques significativos, quedando definido cada enfoque por un índice de valor entre 0 y 5. El elemento 0 de esta matriz queda asignado al blanco de emergencia, el cual designará el punto donde deberá apuntar el helióstato en caso de disparo o emergencia en el receptor. Los elementos de esta matriz con números 1, 2 y 3 corresponderán a blancos dispuestos en posiciones espaciales fuera del receptor, definiendo un camino o pasillo de seguridad por el que pasará el foco del helióstato en sus movimientos de subida/bajada al principio o final del día operativo. El elemento 4 determinará el punto final

del pasillo y corresponderá con el blanco de seguimiento desfasado en el cual el helióstato permanecerá a la espera de ser enviado, por el control de planta, a enfoque normal en el receptor. Este último blanco queda definido por el elemento número 5.

Las coordenadas topográficas, en milímetros, definen la posición del helióstato en el campo con respecto al sistema de referencia mencionado.

Los parámetros de supervivencia definen las actuaciones del control en los supuestos de alta velocidad de viento (vien) y pérdida de comunicaciones (Tout). También definen los tiempos de respuesta periódica y los ciclos periódicos a realizar de forma automática.

El parámetro ***estado*** nos memoriza el último estado adquirido por el helióstato antes de un corte de tensión y el ***adelanto*** en número de horas de adelanto con respecto a la hora solar.

2.2.4. Estrategias operativas.

Debido a la gran versatilidad que nos aporta la autonomía y parametrización del helióstato, es posible desarrollar otro nuevo concepto al que denominamos "estrategia".

Definimos este concepto como el conjunto de acciones, configuraciones del campo solar y decisiones convenidas por el personal de operación y/o investigador para:

- Llevar al proceso, de forma automática, a posición segura ante la presencia de eventos de operación o emergencias del proceso (estrategias de desenfoque).
- Llevar al proceso, de forma automática, a posición segura ante la presencia de condicionantes externos extremos (alta velocidad de viento, alta temperatura...) o ante pérdidas de comunicación con el control central (estrategias de autoprotección).
- Controlar, en todo momento, las reflexiones no deseadas asignando a cada helióstato o grupo de ellos un camino de seguridad para la subida y bajada del foco (estrategias de seguridad y puesta en marcha).

- Recabar el tipo de información necesaria procedente del campo de helióstatos de acuerdo a necesidades operativas o de otra índole (estrategias de captura de la información).
- Definir estrategias convenidas de apunte en el receptor o absorbedor solar para la obtención de distribuciones de flujo energético apropiadas (estrategias de apunte).
- Definir las posiciones características del campo solar tales como la posición de abatimiento, defensa, lavado... (estrategias operativas).
- Definir los parámetros característicos del helióstato tales como bandas de seguimiento, *offsets*, hora, calendario, ajustes de ejes... (estrategias operativas y de control).
- Establecer la realización automática de ciclos operativos programados tales como operación orto-ocaso, letargo nocturno... (estrategias de automatización).

Ya que cada control local en el campo solar, dispondrá de una parametrización propia, será posible configurar cada uno de ellos con el objeto de obtener un resultado final de acuerdo con la estrategia convenida por los diseñadores de la planta. Será posible tener tantos pasillos de seguridad, focos de seguimiento desfasado, focos de receptor, focos de emergencia... como helióstatos tenga el campo solar. Lo normal será, de acuerdo con unas estrategias iniciales, definir los puntos característicos del campo solar y asignar grupos de helióstatos a cada uno de ellos.

Una vez configurado el campo, durante la puesta en marcha de la instalación, podrá ser reconfigurado posteriormente tantas veces como sea necesario, con arreglo a necesidades:

- **estacionales:** (configuración de invierno o verano).
- **operativas:** (configuración de grupos, modificación de offsets,..).
- **de desenfoque:** ante una emergencia, cada helióstato tendrá definido de antemano cuál será su foco. (configuración de desenfoque controlado y acorde con las características del receptor solar).
- **de enfoque**: cada helióstato tendrá definido un foco dentro del receptor con arreglo a una estrategia global de apunte.

- **de seguridad:** definiendo las acciones que realizarán los helióstatos en supuestos tales como avería, alto viento, baja tensión batería, pérdida de comunicaciones con el control central, etc.
- **de control y automatización:** definiendo acciones automáticas o la realización de ciclos programados.

El operador, desde la consola del control central, tendrá información actualizada del estado de todos y cada uno de los helióstatos mediante la realización de rondas de petición de estado periódicas (*polling),* realizadas de forma automática por el control central. No obstante, y debido a que estas rondas podrían llevar cierto tiempo, el operador podrá pedir información o enviar una orden a un helióstato o grupos de helióstatos en cualquier momento. Los mensajes generados desde el control central serán enviados con prioridad, quedando interrumpida la ronda. Con ello se asegura una mayor velocidad de respuesta de los helióstatos ante un cambio de consigna o ante una petición de estado particular.

El operador, siguiendo estrategias operativas, podrá enviar a aquellos helióstatos que lo necesiten o a los que no sean requeridos en la operación normal de la planta solar, a seguimiento perpendicular a los rayos del sol para una captación mayor de energía fotovoltaica. Igualmente, y siempre que sea necesario, realizará un ajuste en la parametrización de los helióstatos por motivos: estacionales, operativos, de estrategia de enfoque, de control, seguridad o automatización.

El operador, al comenzar el día, realizará una sincronización de relojes de los helióstatos y, si así lo exigiera la estrategia de operación del receptor solar, configurará el campo solar enviando a cada helióstato o grupo de ellos los diferentes parámetros como resultado de un estudio en el comportamiento del mismo. Un ejemplo será la consigna que cada helióstato adoptaría en el caso de emergencia en el receptor. Con ello conseguiremos que, mediante una orden sencilla enviada simultáneamente a todos los helióstatos del campo, cada helióstato tenga ya definida su actuación. Mediante este concepto se consigue una respuesta instantánea muy importante en casos de emergencia.

Igualmente, y con el objeto de controlar la distribución de flujo energético dentro del receptor solar de acuerdo a limitaciones constructivas del mismo o por condicionantes meteorológicos o de otra índole, cada helióstato tendrá definido un foco que incidirá en una determinada superficie del receptor solar. El campo será configurado para conseguir el perfil energético deseado en diferentes estaciones del año o bajo diferentes modos de operación de la planta.

Las condiciones de seguridad serán igualmente configuradas para el campo de helióstatos y acotadas de acuerdo con los objetivos operativos y de seguridad prefijados. Cada helióstato, si así se indica, podrá decidir la adopción de medidas para garantizar su integridad o la seguridad global de la planta solar. Así se podrá incorporar:

- un desenfoque automático y progresivo del campo cuando el control central deje de comunicar con los helióstatos durante un período de tiempo determinado (*Timeout)*,
- un envío automático a seguimiento normal al sol cuando el autoabastecimiento energético peligre en condiciones de luz favorables,
- un abatimiento automático en condiciones de baja tensión de batería y la adopción de procesos de ahorro energético (letargo),
- un envío automático a posición de defensa, en condiciones locales extremas de viento, cuando, por algún motivo, el control central no comunica la emergencia al campo de helióstatos.

El operador, informado por el control central, indicará al departamento de mantenimiento cuantas averías hayan sido registradas adjuntando el autodiagnóstico recibido de los helióstatos afectados.

Todas estas tareas de configuración podrán ser realizadas de forma automática desde el control central con arreglo a una estrategia global de la planta solar. La reconfiguración del campo podrá realizarse en tiempo real durante la operación, de acuerdo con algoritmos de control más sofisticados (controles globales de planta).

Con los conceptos de autonomía, parametrización y configuración *online* del campo solar se posibilita el empleo de controles globales de planta. Este concepto de control global de planta elimina al control central del campo de helióstatos como hoy lo conocemos.

2.2.5. Comunicaciones y protocolos

Cada control local en el campo dispone de dos números de identificación, uno que designa el grupo al que pertenece y otro que lo identifica dentro del grupo. Estos dos números pueden adoptar los valores de 48 a 255 por lo que la capacidad de direccionamiento de este sistema es de 208 grupos multiplicado por 208 helióstatos por grupo lo que hace un total de 43264 helióstatos. Un tercer número de identificación podrá ser también usado y asignará a la línea de comunicaciones o al canal de radio empleado lo que nos posibilitaría direccionar un número casi ilimitado de helióstatos.

El protocolo en las comunicaciones será común para las diferentes aplicaciones. El concepto de control local autónomo, junto con el concepto de parametrización, nos lleva a emplear protocolos con mensajes muy concisos y simples. Debido a que todo queda predefinido de antemano con arreglo a una estrategia determinada, solamente será necesario indicar el tipo de orden a ejecutar por el control local quedando los parámetros asociados a esta orden, predefinidos en la parametrización. Este ahorro en el tráfico de las líneas de comunicaciones facilita sin duda el empleo de comunicaciones por radio ya que disminuimos el tráfico y los tiempos de ocupación de los canales de radio.

El campo de helióstatos puede estructurarse mediante grupos y lo normal será que cada grupo de helióstatos corresponda con una línea de comunicaciones caracterizada por una frecuencia única y diferente al resto.

En comunicaciones para un campo de helióstatos autónomos será empleada una topología en estrella con un protocolo de comunicaciones tipo ***Polling*** (ronda periódica) bidireccional, donde una estación central interroga a cada helióstato dándole ordenes y leyendo de éstos sus estados (ver figura 2.14).

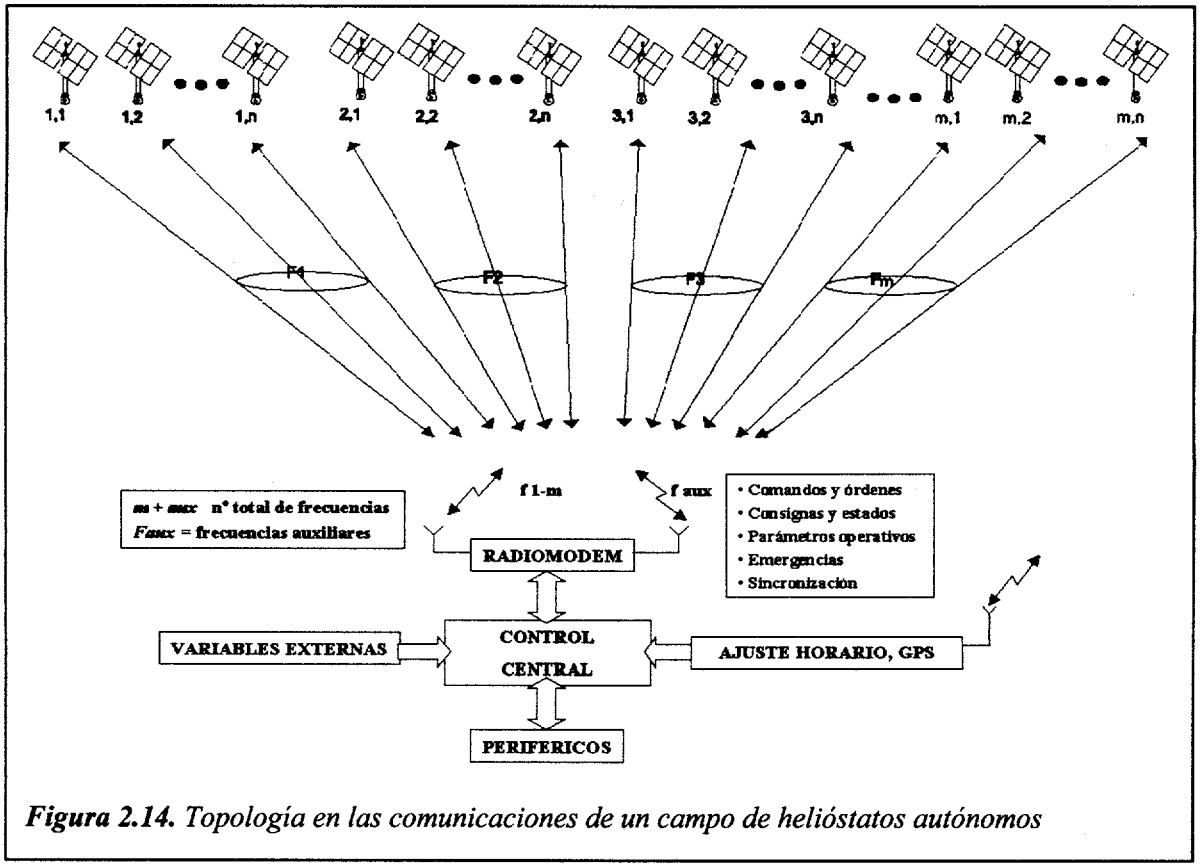

Figura 2.14. *Topología en las comunicaciones de un campo de helióstatos autónomos*

Para aumentar la velocidad total de las comunicaciones, se divide el campo de helióstatos en ***m*** grupos con ***n*** helióstatos por grupo, necesitándose ***m*** canales bidireccionales, cada uno de ellos trabajando en una frecuencia de radio distinta.

Existen unos canales auxiliares en número proporcional al número total de helióstatos del campo, destinados a que los helióstatos que tengan eventos que deban ser comunicados con urgencia al control central puedan efectuar una transmisión fuera del *polling*, en el primer canal auxiliar que quede libre. Esta comunicación es controlada por el microcontrolador del radiomodem, a petición de la tarjeta de control.

Para la sincronización de todos los helióstatos del campo solar, se empleará un sistema basado en GPS[8]. Una operación rutinaria que deberá efectuarse desde el control central, bajo el asesoramiento de este patrón de hora, será la sincronización de todos los relojes del campo de helióstatos, al menos una vez al día.

[8] Global Position System, GPS.

Cuando un helióstato recibe un mensaje (trama) desde el control central, el control local analizará si el mensaje va dirigido a él y llega con la secuencia y forma establecidas. Si el resultado de este proceso es válido, el control local procederá a descifrar e interpretar la trama recibida contestando inmediatamente, si el mensaje era una petición de estado, o asimilando el mensaje, si este correspondía con una orden.

Ningún control local instalado al sistema de comunicaciones del campo de helióstatos enviará mensajes a no ser que sea interrogado o solicitado por el control central. El control de la secuencia de petición de estados o envío de órdenes corresponderá al control central.

El control central realizará un *polling* continuo con el fin de obtener los estados de todos y cada uno de los helióstatos del campo en el menor tiempo posible. Este *polling* únicamente será interrumpido cuando el control central, tras recibir la última contestación pedida, necesite enviar una orden individual o colectiva. Una vez realizado el envío de esta orden, el *polling* se continuará por el punto donde se interrumpió.

Se pueden definir varios tipos de *polling* dependiendo del volumen de información que se desea recibir del campo de helióstato en tiempo real. Estos podrán ser empleados a voluntad del operador o como consecuencia de una estrategia de operación determinada. Uno de estos, el *polling básico*, incluirá la información mínima necesaria para la operatividad del campo. Este *polling* será el más dinámico y podrá ser empleado durante la operación rutinaria del campo de helióstatos. Los otros *polling* incluirán, además de la información básica, información adicional y su empleo se realizará cuando se necesite una mayor supervisión e información en procesos especiales, ensayos para la evaluación o durante la puesta en marcha de la planta solar. En cualquier caso el tipo de *polling* será decidido cuando, a petición de los operadores, se requiera un mayor conocimiento sobre el comportamiento de los helióstatos.

Como mínimo se definen dos tipos de *polling:* el básico y el operativo. El *polling* básico consistirá en la petición de los estados y los diagnósticos de funcionamiento a cada helióstato. El *polling* operativo, además de la información básica, solicitará las consignas y posiciones de cada helióstato. Ambos podrán ser seleccionados desde el control central. Otros tipos de

polling podrán ser definidos posteriormente, con arreglo a la experiencia o por exigencias de la operación.

Para poder cumplir con tiempos de refresco operativos, será necesario modular el campo de helióstatos en líneas de comunicaciones o canales de radio y hacer un estudio del tráfico de datos existente por las mismas.

2.2.5.1. Comandos y mensajes

Los mensajes transferidos podrán corresponder con peticiones de información o envío de ordenes al campo. Si hacemos coincidir el número de grupo con el número de línea de comunicaciones o canal de radio, las peticiones podrán ser:

- Mensajes a un grupo y helióstato determinado. Contestará sólo el helióstato especificado.
- Mensajes a todos los grupos y helióstato determinado. Contestarán todos los helióstatos correspondiente al número indicado de cada grupo.

El envío de ordenes al campo desde el control central podrán ser:

- Orden a un grupo y helióstato determinado. Asimilará la orden sólo el citado helióstato.
- Orden a todos los grupos y helióstato determinado. Asimilarán la orden todos los helióstatos correspondientes al número indicado de cada grupo.
- Orden a todos los helióstatos de un grupo.
- Orden a todos los grupos y a todos los helióstatos.

Si hacemos distinción entre número de grupo y número de línea, tendremos una mayor flexibilidad en la modulación y aceptación simultánea de las órdenes enviadas al campo de helióstatos. De esta manera podremos definir diferentes grupos en cada línea de comunicaciones por lo que podríamos enviar órdenes a:

- Todos los helióstatos, de todos los grupos y de todas las líneas.
- Todos los helióstatos, de un grupo y de todas las líneas.
- Todos los helióstatos, de todos los grupos y de una línea
- Todos los helióstatos, de un grupo y de una línea
- Un helióstato, de todos los grupos y de todas las líneas.
- Un helióstato, de un grupo y todas las líneas.
- Un helióstato, de un grupo y una línea.
- Un helióstato, de todos los grupos y de una línea.

A continuación se especifican los tipos de mensajes mediante una letra a la que denominamos identificador. Una letra minúscula designará a un mensaje enviado por el control central hacia el campo con el fin de la ejecución de una orden individual o colectiva. Las letras mayúsculas designarán mensajes que corresponderán con petición de información o a asignación de nuevos parámetros.

En la tabla 2.5 se muestran los identificadores empleados indicando su función, la descripción y el número de parámetros asociados a cada uno de ellos.

Tabla 2.5. Identificación de los mensajes			
Identificador	**PARÁMETROS**		**DESCRIPCIÓN**
a	-	orden	Maniobra de abatimiento (sin pasillo)
b	-	orden	Bajar a abatimiento por pasillo de seguridad
c	-	orden	Búsqueda de ceros o referencias de ambos ejes
d	-	orden	Ir a seguimiento desfasado (sin pasillo)
e	-	orden	Enfoque a caldera (sin pasillo)
f	n x,y,z	orden	Ir a foco definido con número *n* (0 a 9) Ir a foco de coordenadas *x, y, z* (en mm)
i	-	orden	Inmoviliza helióstato
n	-	orden	Ir a seguimiento normal (máxima captación FV)
l	n	orden	Ir a Letargo tipo *n* (0 a 9)
p **(*)**	n az,el	orden	Ir a punto significativo con número *n* (0 a 9) Ir a punto definido por *az,el* (en bits)
q	-	orden	Quita helióstato. Ir a foco de emergencia.
s	-	orden	Subir a seguimiento desfasado por pasillo seguridad
C **(*)**	- az, el	Petición Asignación	Petición de ajustes de eje actuales Asigna nuevos ajustes *az, el* (en bits)
F **(**)**	n n,x,y,z	Petición Asignación	Petición coordenadas del foco *n* (0 a 9) Asigna al foco *n* las coordenadas *x, y, z* (mm)
H	- hh,mm,ss hh,mm,ss,d	Petición Asignación Asignación	Petición de hora (hh:mm:ss,d) Asigna nueva hora Asigna nueva hora y desfase con hora solar
I	- ng,nh,az,el,bm	Petición Asignación	Petición parámetros de identif y tracking Asignación parámetros (0 a 255)
O **(*)**	- az, el	Petición Asignación	Petición de los offsets actuales Asigna nuevos offsets *az, el* (en bits)
P **(***)**	n n,az,el	Petición Asignación	Petición del punto significativo *n* Asigna al punto *n* la posición *az, el* (en bits)
R	- n	orden orden	Restaura fallo Resetea con (n=1) o sin (n=2) último estado
S	- vie,cic,adq,tout	Petición Asignación	Petición de parámetros de seguridad Asigna nuevos parámetros (0 a 255)
T	- dd,mm,aa	Petición Asignación	Petición de fecha (dd/mm/aa) Asigna nueva fecha
?	- n	Petición Petición	Petición información básica Petición información básica + nivel *n*

Notas:

(*) Cuando se especifica que el valor de un parámetro debe venir expresado en bits queremos indicar que se trata de un valor entero de 0 a 14400 (rango dado por la resolución del codificador angular, empleado para medir la posición de los ejes del helióstato y que corresponde a un ángulo de 0 a 360º).

(**) Cada control local tiene definida una matriz de coordenadas de enfoque denominada con la letra F en donde se memorizan seis valores de foco definidos cada uno por tres coordenadas, (x,y,z) expresadas en milímetros. Los elementos de esta matriz pueden ser alterados de valor mediante el empleo del identificador **"F"** permaneciendo almacenados en

una memoria no volátil. Con el identificador **"f"** se ordena al helióstato alcanzar un determinado blanco definido como elemento *n de* la matriz.

(***) Cada control local tiene definida una matriz de puntos significativos, asignada con la letra P, en donde se memorizan cuatro posiciones absolutas del helióstato, en bits de cada eje del helióstato (acimut y elevación). En el elemento 0 de esta matriz se define la posición de abatimiento del helióstato y en el elemento 1 se determina la posición de defensa. El resto de elementos, del 2 al 3, pueden ser utilizados para usos o estrategias particulares de operación. Los elementos de esta matriz pueden ser alterados de valor mediante el empleo del identificador **"P"**, permaneciendo almacenados en una memoria no volátil. Con el identificador **"p"** se ordena al helióstato alcanzar una determinada posición absoluta definida como elemento *n* en la matriz de puntos significativos.

2.2.5.2. Identificadores de órdenes.

Los identificadores representados con una letra minúscula corresponden a mensajes enviados al helióstato y clasificados como órdenes o comandos. Ante este tipo de mensajes, el helióstato o helióstatos afectados asimilarán la orden transmitida sin contestar ni enviar mensaje alguno hacia el control central. Estos son :

Identificador "a" : Corresponde con la orden de abatimiento y no es necesario especificar ningún parámetro. La acción del helióstato será el conseguir la posición de reposo o de abatimiento definida en el punto significativo P(0).

Identificador "b" : Corresponde con la orden de bajar hasta la posición de abatimiento desde el punto de seguimiento desfasado, siguiendo un pasillo de seguridad marcado por los puntos F(4), F(3), F(2), F(1) y P(0). No es necesario especificar ningún parámetro.

Identificador "c" : Corresponde con la orden de búsqueda de ceros (referencias absolutas) y no es necesario especificar ningún parámetro. La acción del helióstato será el hacer mover sus

motores en el sentido de Bajar/Este para barrer todas las posiciones operativas hasta encontrar la referencia absoluta, definida como posición angular cero en ambos ejes.

Identificador "d" : Corresponde con la orden de desenfoque y no es necesario especificar ningún parámetro. La acción del helióstato será realizar un seguimiento al blanco definido en el punto de la matriz de enfoques F(4), correspondiente al blanco de seguimiento desfasado.

Identificador "e" : Corresponde con la orden de enfoque en caldera (receptor) y no será necesario especificar ningún parámetro. La acción del helióstato será realizar un seguimiento al blanco definido en el punto de la matriz de enfoque F(5) correspondiente al blanco de seguimiento a caldera.

Identificador "f" : Corresponde con la orden de enfoque al foco definido en el elemento *n* de la matriz de enfoques. Si va precedido de tres parámetros el helióstato enfocará al blanco definido por éstos, los cuales corresponderán a las coordenadas en milímetros X, Y, Z, del foco en cuestión.

Identificador "i" : Corresponde con una orden que pretende la inmovilización inmediata de los ejes del helióstato en la posición que tuvieran en ese instante. Al identificador no le sigue ningún parámetro.

Identificador "l" : Corresponde con la orden de estado de letargo. La acción del helióstato, estando previamente en estado de abatimiento, será la de desconectar consumos innecesarios con objeto de ahorrar energía, bien en períodos nocturnos, días nublados o cuando el operador lo considere oportuno. Aunque no es necesario parámetro alguno, un dígito, del 0 al 9, podrá utilizarse para la selección de futuros procesos de ahorro energético.

Identificador "n" : Corresponde con una orden de seguimiento normal a los rayos solares, de manera que la captación de energía sobre el plano especular del helióstato sea máxima. Este proceso garantizará una mayor producción de energía fotovoltaica y será empleada cuando, en condiciones favorables de luz, la energía acumulada en la batería alcance valores bajos debido

a largos períodos de baja o nula insolación o cuando ésta se haya consumido debido a operaciones de subida-bajada repetitivas durante el día. No necesita ningún parámetro.

Identificador "p" : Corresponde con la orden de envío al helióstato a una posición absoluta definida en el elemento de la matriz de puntos significativos especificado por el parámetro que sigue al identificador (número del 0 al 9), P(n). Si va precedido de dos parámetros el helióstato buscará la posición definida por los mismos en su eje de acimut y de elevación, permaneciendo en esta posición fija hasta nueva orden.

Identificador "q" : Corresponde con la orden de desenfoque de emergencia. La acción del helióstato será realizar el seguimiento a un blanco definido como emergencia en la matriz de enfoques, F(0). A este identificador no le sigue ningún parámetro.

Identificador "s" : Corresponde con la orden de subir al punto de seguimiento desfasado desde la posición de abatimiento siguiendo un pasillo de seguridad marcado por los puntos P(0), F(1), F(2), F(3) y F(4). No es necesario especificar ningún parámetro.

2.2.5.3. Identificadores de petición de información y asignación.

Los identificadores representados con una letra mayúscula corresponden a mensajes enviados al helióstato y clasificados como peticiones de información o de asignación de parámetros. Ante un mensaje de asignación de parámetros, el helióstato o helióstatos afectados asimilarán el nuevo valor asignado al parámetro especificado sin contestar ni enviar mensaje alguno hacia el control central. Un mensaje de petición de información será enviado a un único helióstato de la línea, esperando la respuesta inmediata del mismo. Estos son:

Identificador "C" : Corresponde a mensajes de petición o modificación de los parámetros de ajuste de ejes del helióstato. Si al identificador no sigue parámetro alguno, el resultado será una petición de los parámetros de ajuste de ejes. En este caso, el helióstato contestará los siguientes parámetros en el orden indicado:

a.- valor del ajuste en el eje de acimut (en bits)

b.- valor del ajuste en el eje de elevación (en bits)

El objetivo es ajustar la posición de las referencias de los codificadores del helióstato con la posición real absoluta de inicio de los movimientos (ceros). Si después del identificador siguen dos parámetros, el resultado será la asignación de los nuevos valores a los parámetros de ajuste.

Identificador "F" : Corresponde a mensajes de petición o modificación de los parámetros de enfoque del helióstato. Si al identificador no sigue parámetro alguno, el resultado será una petición de las coordenadas en milímetros del último blanco utilizado. Si al identificador le sigue un único parámetro **n**, el resultado será una petición de las coordenadas de blanco del elemento F(n) de la matriz de enfoques. Si al parámetro **n** le siguen otros tres, **X,Y,Z**, el resultado será la asignación al blanco F(n) de las nuevas coordenadas.

Identificador "H" : Corresponde a mensajes de petición o modificación de hora. Si al identificador no le sigue parámetro alguno, el resultado será la petición de la hora contestando el helióstato los siguientes parámetros y por este orden:

a.- Hora

b.- Minuto

c.- Segundo

d.- Número de horas de adelanto con respecto a la hora solar.

Si después del identificador siguen tres o cuatro parámetros, el resultado será una asignación de la nueva hora y del número de horas de adelanto con respecto a la hora solar.

Identificador "I" : Corresponde a mensajes de petición o modificación de parámetros de identificación y de movimiento en el seguimiento solar. Si al identificador no le sigue parámetro alguno, el resultado será la petición de los valores actuales de los parámetros siguientes:

a.- número de identificación del grupo al que pertenece (0-255)

b.- número de identificación dentro del grupo (0-255)

c.- valor de la banda muerta de seguimiento en el eje de acimut (en bits)

d.- valor de la banda muerta de seguimiento en el eje de elevación (en bits)

e.- valor de la banda de aproximación a consigna (en bits)

Si al identificador le siguen tres parámetros podrá suceder:

a) Si el primer parámetro coincide con un código secreto conocido sólo por personal autorizado, los siguientes dos parámetros corresponderán a los nuevos números de identificación de grupo y helióstato **a** y **b**.

b) Si el primer parámetro no coincide con este código secreto, estos tres parámetros corresponderán a los indicados anteriormente con **c, d** y **e**.

Identificador "O" : Corresponde a mensajes de petición o asignación de *offsets* del helióstato. El *offset* es una pequeña corrección realizada en la consigna calculada de cada eje para llevar el foco al punto deseado. Con este parámetro se pretenden corregir pequeñas desviaciones producidas por desajustes de cálculo, mecánicos y/u ópticos. Si al identificador no sigue parámetro alguno, el resultado será una petición de los valores de ambos ejes. Si al identificador le sigue dos parámetros **of_az** y **of_el**, el resultado será una nueva asignación de dichos valores (en bits).

Identificador "P" : Corresponde a mensajes de petición o modificación de los puntos significativos de la matriz P(n). Si al identificador le sigue un único parámetro **n**, éste será el número del elemento de la matriz. En este caso el resultado será la petición del valor especificado en el elemento P(n). Si a este parámetro **n** le siguen otros dos, **az** y **el**, el resultado será la asignación al elemento P(n) de los valores (en bits) de la posición de los ejes del helióstato.

Identificador "T" : Corresponde a mensajes de petición o modificación de fecha. Si al identificador no le sigue parámetro alguno, el resultado será la petición de la fecha contestando el helióstato los siguientes parámetros y por este orden:

a.- Día. b.- Mes. c.- Año.

Si después del identificador siguen tres parámetros, el resultado será una asignación de la nueva fecha indicada por los mismos.

Identificador "R" : Corresponde con una acción de restablecimiento ante la presencia de un fallo en el funcionamiento del helióstato. Si no sigue parámetro, la acción será "Restaura fallo". Si al identificador le sigue un parámetro **n,** la acción será diferente sí:

n = 1 : Reset hardware y software del control local sin pérdida del estado y de la posición.
n = 2 : Reset hardware y software del control local con retorno a la posición de abatimiento.

Identificador "S" : Corresponde a mensajes de petición o modificación de los parámetros de seguridad y autoprotección. Si al identificador no le sigue parámetro alguno, el resultado será la petición de los valores actuales de los siguientes parámetros y en este orden:

a.- Temporización y/o nivel de viento para emergencia.
b.- Realización de ciclos diarios automáticos (codificado).
c.- Respuesta periódica (en segundos).
d.- "*Time out*" en segundos. Emergencia por pérdida de comunicaciones.
Si después del identificador siguen cuatro parámetros, el resultado será una asignación de los nuevos valores.

Identificador "V" : Corresponde únicamente con mensajes de petición de los valores leidos desde el convertidor A/D. Si al identificador no le sigue parámetro alguno, el resultado será la petición de los valores de los 8 canales posibles medidos en milivoltios. Si después del identificador se indica un dígito ***n*** (0-7) el valor pedido corresponderá al canal especificado.

Identificador " ?" : Corresponde siempre con una petición de información al helióstato. Si después del identificador no sigue parámetro alguno o este es el valor cero, el resultado será el envío de la información básica correspondiente al polling de nivel básico (ver apartado

2.2.5.6). Si al identificador le sigue un parámetro **n** (0-9) la información devuelta por el helióstato será diferente dependiendo del valor de éste de tal forma que:

- **n = 1** (nivel 1): información básica + consigna (en bits) + posición (en bits)
- **n = 2** (nivel 2): información nivel 1 + último foco activo (X,Y,Z en mm)
- **n = 3** (nivel 3) : información nivel 2 + acimut solar + ángulo cenital solar (en grados)
- **n = 4** (nivel 4) : información nivel 3 + ? ? ? (a definir)

2.2.5.4. Estructura de los mensajes

Todos los mensajes intercambiados entre el control central y los helióstatos del campo solar tienen tres partes perfectamente diferenciadas. Están formados por una cabecera, un cuerpo o zona de parámetros y una finalización. Esta estructura, idéntica para cada línea de comunicaciones, se describe a continuación:

CABECERA: Compuesta por los siguientes tres bytes:

<nº de grupo> byte con valor desde el 48 al 255 (208 grupos máximo)
<nº de helióstato> byte con valor desde el 48 al 255 (208 helióstatos máximo)
<Identificador tipo del mensaje> valor desde el carácter **?** (0x3F), hasta la **z** (0x7A); (60 identificadores máximo)

Tabla 2.6. *Cabecera del mensaje*

	1er byte	**2º byte**	**3er byte**
EJEMPLO	nº de grupo	nº de helióstato	identificador mensaje
Carácter ASCII	1	1	T
Código	49 (0x31)	49 (0x31)	84 (0x54)

ZONA DE PARÁMETROS: Sin ningún carácter separador, comienza a continuación de la cabecera. Cada parámetro podrá tener hasta 6 bytes correspondiendo cada uno de ellos a un dígito (0 al 9 en ASCII). Podremos especificar hasta un máximo de 6 parámetros separados,

entre ellos, por comas (código ASCCI = 0x2C). La tabla 2.6 muestra un ejemplo de composición de esta zona.

Tabla 2.7. Cuerpo del mensaje, zona de parámetros.

	4° byte	5° byte	6° byte	7° byte	8° byte	9° byte	10° byte	11° byte
	1er PARAMETRO		separador	2° PARAMETRO		separador	3er PARAMETRO	
EJEMPLo	1er dígito	2° dígito		1er dígito	2° dígito		1er dígito	2° dígito
car. ASCII	2	4	,	1	0	,	9	7
Código	50 (0x32)	52 (0x34)	45 (0x2C)	49 (0x31)	48 (0x30)	45 (0x2C)	57 (0x39)	55 (0x37)

FINALIZACIÓN DEL MENSAJE: Se compone de los siguientes tres caracteres:

<Fin mensaje> En un mensaje con parámetros seguirá al último dígito del último parámetro introducido. En un mensaje sin parámetros seguirá al byte <identificador del mensaje>. Será siempre el carácter ASCII "/" (valor 0x2F).

<Checksum> Será el byte cuyo valor sea el resultado de efectuar la operación XOR con todos los bytes del mensaje (en el ejemplo desde el primero hasta el doceavo, ambos inclusive).

<Retorno de carro> Será el último carácter del mensaje y corresponderá al valor 0x0D en la tabla ASCII.

Tabla 2.8. Finalización del mensaje

	12° byte	13° byte	14° byte
EJEMPLO	fin mensaje	checksum	Retorno carro (CR)
Carácter ASCII	/		CR
Código	59 (0x2F)		13 (0x0D)

El ejemplo corresponde (ver tabla del apartado anterior) al mensaje enviado desde el control central hacia el helióstato número 1,1. Este mensaje de cambio de fecha es asimilado únicamente por el helióstato número 1,1. La fecha enviada es el 24 de octubre de 1997. En ASCII el mensaje completo del ejemplo sería: **11T24,10,97/a<cr>**

2.2.5.5. Ejemplos de tramas.

Tabla 2.9. Ejemplos de tramas

CONTROL CENTRAL		CONTROL LOCAL	
TRAMA	**Descripción**	**TRAMA**	**Descripción**
Mensajes al helióstato 1,1			
11T24,10,97/<cs><cr>	Cambia la fecha al hel. 1,1	**No contesta trama**	Asimila cambio fecha
11T/<cs><cr>	Pide fecha al hel. 1,1	**11T24,10,97/<cs><cr>**	Contesta con fecha
11?/<cs><cr>	Pide información básica	**11?est,diag,d_az,d_el/ <cs><cr>**	Contesta informac. Básica **est** = byte de estado **diag**= byte de diagnóstico **d_az**= byte diagnost.Az **d_el**= byte diagnost.El
11?1/<cs><cr>	Pide información nivel 1	**11?est,diag,d_az,d_el, get_az,pos_az,get_el, pos_el/<cs><cr>**	Contesta info. Básica más: **get_az** = consigna acimut **pos_az** = posición acimut **get_el** = consigna elevac. **pos_el** = posición elevac.
11O/<cs><cr>	Pide valores de offsets	**11OofAz,ofEl/<cs><cr>**	Contesta con offsets ejes
Mensaje a todos los helióstatos n° 1 de todos los grupos			
01f3/<cs><cr>	Ir al punto de enfoque n°3	**Nadie contesta**	Todos los helióstatos n° 1 de todos los grupos aceptan y ejecutan
01F0,0,0,60000/<cs><cr>	Modifica blanco de emergencia	**Nadie contesta**	Idem
Mensaje a todos los helióstatos del grupo 1			
10H10,0,0,2/<cs><cr>	Cambia hora a todos los helióstatos del grupo 1	**Nadie contesta**	Todos los helióstatos del grupo asimilan el cambio
10e/ <cs><cr>	Manda a enfoque a todos los helióstatos del grupo 1	**Nadie contesta**	Todos los helióstatos del grupo ejecutan la orden
10l/<cs><cr>	Manda a letargo	**Nadie contesta**	Todos los helióstatos del grupo ejecutan la orden
10R1/ <cs><cr>	Restaura sin perder posición ni estado	**Nadie contesta**	Todos los helióstatos del grupo ejecutan la orden
Mensajes a todos los helióstatos de la línea			
00p500,500/ <cs><cr>	Todos los helióstatos a posición fija 500,500 bits	**Nadie contesta**	Todos asimilan y ejecutan
00a/ <cs><cr>	Abatimiento de todos los helióstatos (sin pasillo seg.)	**Nadie contesta**	Todos asimilan y ejecutan
00P1,250,100/ <cs><cr>	Asigna al punto 1 la posic. fija 250,100 bits	**Nadie contesta**	Todos asimilan el cambio del parámetro
00s/ <cs><cr>	Todos los helióstatos suben por pasillo de seguridad a seguim. desfasado desde pos.abatiment	**Nadie contesta**	Todos asimilan el cambio del parámetro

2.2.5.6. Información básica

En la mayoría de las ocasiones, incluso durante la operación del campo de helióstatos, será más que suficiente para el operador conocer el estado de cada uno de los helióstatos, sin necesidad de conocer las posiciones absolutas de los ejes u cualquier otra información adicional. Dicha información se ha denominado "información básica", la cual ha sido cuidadosamente seleccionada y condensada en cuatro bytes. Uno de los bytes, el transmitido

primero al cual denominamos "byte de estado", llevará una información codificada referente al estado del helióstato. El siguiente byte, denominado "byte de eventos", nos informará de forma codificada, de los eventos registradas durante el funcionamiento del helióstato. Los otros dos bytes, denominados "bytes de diagnóstico" nos informarán de las anormalidades o averías registradas en cada eje.

Cuando es solicitada, desde el control central, una petición de información básica, el control local del helióstato interrogado contestará con la cabecera (3 bytes) seguida por los cuatro bytes mencionados y con la terminación del mensaje (otros tres bytes). En total el helióstato contestará con un mensaje compuesto por 10 bytes.

a) Byte de estado

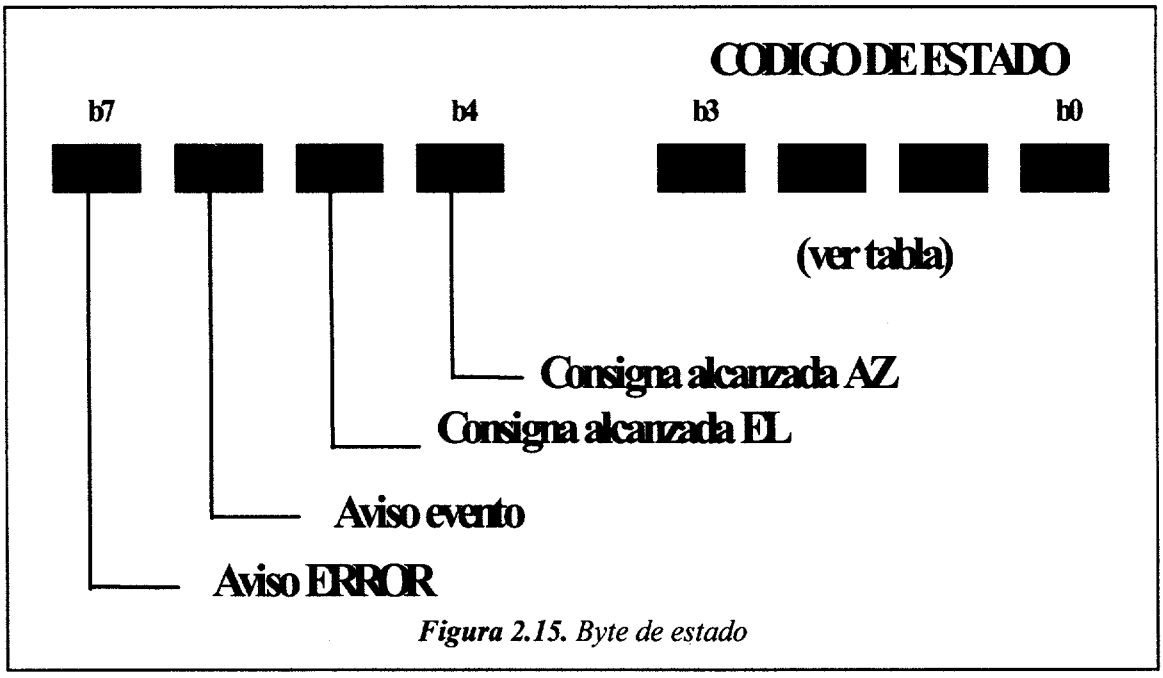

Figura 2.15. Byte de estado

Los cuatro primeros bits nos indicarán el estado del helióstato con arreglo al código mostrado en la tabla 2.10.

	CODIGOS DE ESTADO		
	b3 ...b0	**VALOR**	**ESTADO**
CODIGOS POSICIÓN FIJA	0000	0	Operación local
	0001	1	Consigna fija o inmovilizado
	0010	2	Búsqueda de referencias (ceros)
	0011	3	Punto significativo
	0100	4	Letargo
	0101	5	Posición de defensa (emergencia)
	0110	6	Abatimiento normal
CODIGOS POSICIÓN SEGUIMIENTO	0111	7	Blanco 1 pasillo
	1000	8	Blanco 2 pasillo
	1001	9	Blanco 3 pasillo
	1010	10	Seguimiento desfasado
	1011	11	Blanco de emergencia
	1100	12	Seguimiento normal a caldera
	1101	13	Reserva
	1110	14	Enfoque a foco significativo
	1111	15	Seguimiento normal al sol

Tabla 2.10. *Códigos de estado en el helióstato autónomo*

Consigna alcanzada: Cuando el bit b4 y/o b5 está activo (1) se indica que el estado indicado en los bits anteriores está alcanzado en un eje y/o en el otro. Si está desactivo (0) significa que el eje en cuestión está en transición (moviendo) hacia ese estado.

Aviso evento: Cuando el bit b6 está activo (1) se indica que hay un evento registrado en el byte de eventos siendo aconsejable su lectura inmediata.

Aviso ERROR: Cuando el bit b7 está activo (1) se indica que hay un error registrado en los bytes de diagnóstico siendo aconsejable su lectura inmediata.

b) Byte de eventos

Los códigos recibidos en este byte deberán de asociarse con una tabla de etiquetas, perfectamente modificable. Estás serán, inicialmente las siguientes:

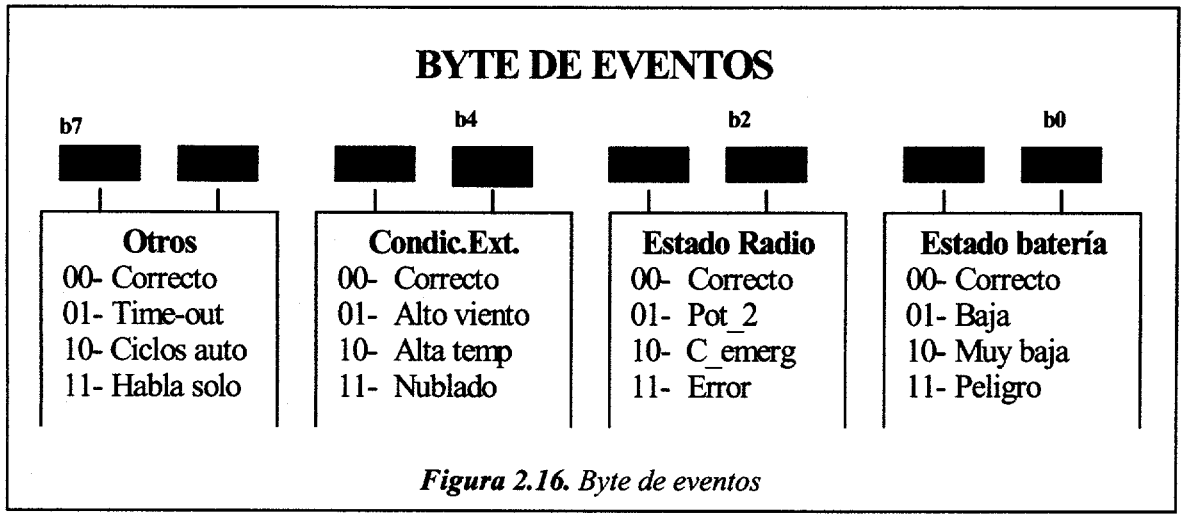

Figura 2.16. Byte de eventos

Código del estado de baterías (bits 0 y 1)		
Cod. Binario	**Cod. dec**	**Etiqueta**
00	0	Todo correcto
01	1	Batería baja
10	2	Batería muy baja (emergencia)
11	3	Peligro de autoabastecimiento
Código del estado de la radio (bits 2 y 3)		
Cod. Binario	**Cod. dec**	**Etiqueta**
00	0	Todo correcto y transmitiendo en baja potencia
01	1	Transmitiendo en potencia alta
10	2	Canal de emergencia activado
11	3	Error en radio
Código de condicionantes externos (bits 4 y 5)		
Cod. Binario	**Cod. dec**	**Etiqueta**
00	0	Todo correcto
01	1	Alto viento (emergencia)
10	2	Alta temperatura (emergencia)
11	3	Condiciones de luz no aptas para la operación
Código de Otros (bits 6 a 7)		
Cod. Binario	**Cod. dec**	**Etiqueta**
00	0	Todo correcto
01	1	Emergencia por Time-out en las comunicaciones
10	2	Realización automática de ciclos periódicos
11	3	Aplicación aislada con respuesta periódica

Tabla 2.11. Códigos en el byte de eventos

a) Bytes de diagnóstico

Cada eje del helióstato tendrá asignado un byte de diagnóstico. El byte de diagnóstico de acimut se transmite primero. Estos bytes están codificados de la siguiente manera:

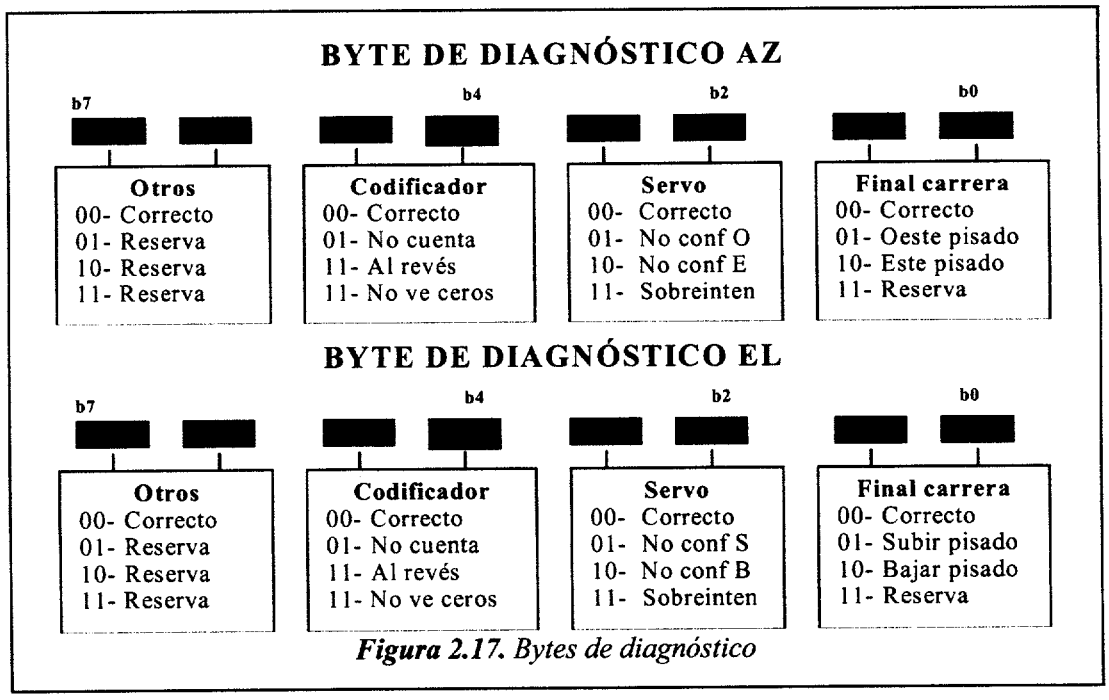

Figura 2.17. Bytes de diagnóstico

Código de finales de carrera (bits 0 y 1)		
Cod. Binario	**Cod. dec**	**Etiqueta**
00	0	Todo correcto
01	1	Pisado Oeste/subir
10	2	Pisado Este/bajar
11	3	Reserva
Código de los servos (bits 2 y 3)		
00	0	Todo correcto
01	1	No confirma Oeste/subir
10	2	No confirma Este/bajar
11	3	Sobreintensidad en motor Az/El
Código de los codificadores (bits 4 y 5)		
00	0	Todo correcto
01	1	No cuenta Az/El
10	2	Gira al revés Az/El
11	3	No encuentra ceros Az/El
Código de Otros (bits 6 a 7)		
00	0	Todo correcto
01	1	Reserva
10	2	Reserva
11	3	Reserva

***Tabla 2.12.** Códigos en los bytes de diagnóstico*

2.2.5.7. Realización de ciclos diarios programados

El segundo parámetro del identificador S contiene un byte con el siguiente código:

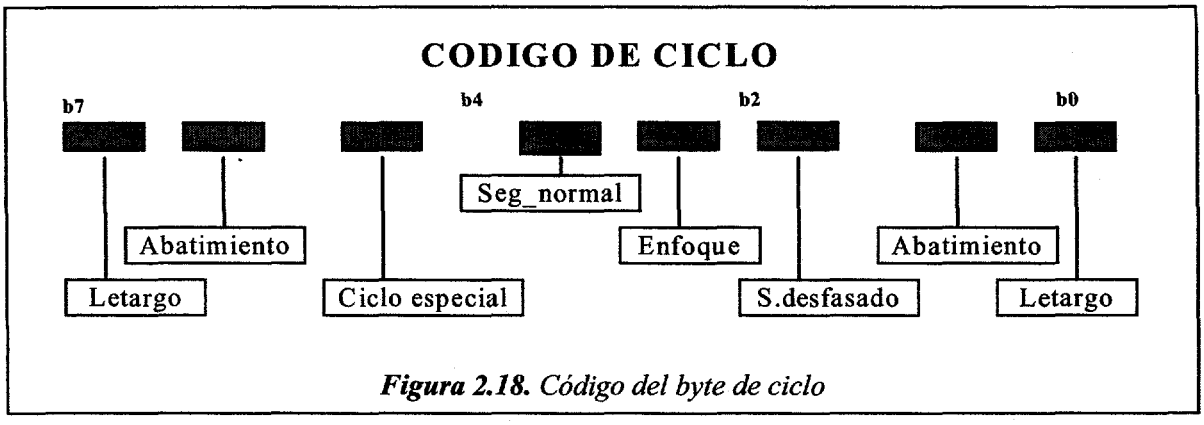

Figura 2.18. Código del byte de ciclo

Código del estado inicial del ciclo (bits 0 y 1) (se ejecuta un poco antes del amanecer)		
Cod. Binario	**Cod. dec**	**Etiqueta**
00	0	Sin ciclo
01	1	Poco antes del amanecer sale de letargo y busca referencias
10	2	En el amanecer recupera la posición de abatimiento
11	3	Ambas
Código de subida a foco (bits 2, 3 y 4) (se ejecuta al comienzo de la operación)		
Cod. Binario	**Cod. dec**	**Etiqueta**
000	0	Sin ciclo
001	1	Sube a seguimiento desfasado por pasillo de seguridad
010	2	Sube a seguimiento de caldera (sin pasillo de seguridad)
011	3	Ambas. Sube por pasillo y enfoca a caldera
100	4	Sube a seguimiento normal al sol sin pasillo de seguridad
101	5	Sube a seguimiento normal al sol por pasillo de seguridad
110	6	Reserva
111	7	Reserva
Código del ciclo especial (bit 5) (se ejecuta sucesivamente durante el día)		
Cod. Binario	**Cod. dec**	**Etiqueta**
0	0	Sin ciclo
1	1	Ciclo especial de subida/bajada ininterrumpida
Código de Otros (bits 6 a 7) (se ejecuta al anochecer)		
Cod. Binario	**Cod. dec**	**Etiqueta**
00	0	Sin ciclo
01	1	Baja a abatimiento sin pasillo de seguridad
10	2	Entra en letargo nocturno
11	3	Ambas

Tabla 2.13. Códigos en el byte de realización de ciclos programados

2.2.6. Controles de mayor jerarquía.

Hasta el año 1998 en el control de campos de helióstatos se establecían las siguientes jerarquías:

- Control o controlador local del helióstato, CLH.
- Sistema de Control Central de helióstatos, SCCH.
- Control de la planta solar, CPS.

La evolución normal que han seguido estos controles a lo largo de los años es el traspaso de progresivo de funciones desde el SCCH hacia los CLH y una mayor integración entre el CLH con el CPS. De esta manera los controladores locales han ido adquiriendo un papel cada vez más importante en la controlabilidad del campo solar.

Desde los años 80 en los que el SCCH se componía de un potente ordenador que realizaba todos los cálculos y era el responsable de la operatividad de un conjunto de helióstatos "tontos" que componían el campo solar y en donde el CPS trabajaba de forma aislada, se ha pasado, a finales de los 90, a todo lo contrario.

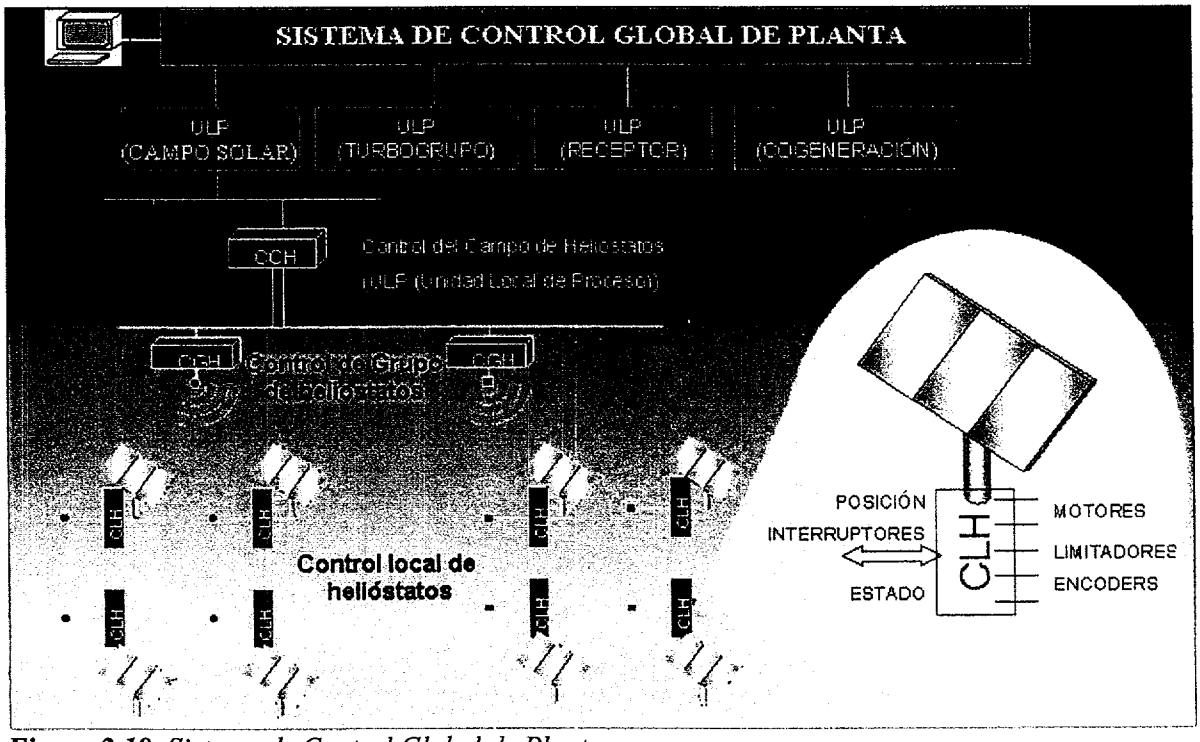

Figura 2.19. *Sistema de Control Global de Planta*

Con el helióstato autónomo es posible el salto definitivo en donde la figura del control central CCH desaparece y viene a potenciarse un tipo de control de mayor jerarquía, más amplio y potente que se ha denominado Sistema de Control Global de Planta, SCGP.

Ya el año 1998, el proyecto DISS desarrollado y ensayado en la Plataforma Solar de Almería, incorpora un campo compuesto por 11 colectores cilíndrico-parabólico de gran tamaño con una estructura de control como la mencionada anteriormente.

Los controladores locales de los colectores de este proyecto son dispositivos que han evolucionado paralelamente al controlador local del helióstato autónomo por lo que, quitando la autonomía física y de alimentación eléctrica, todos los conceptos descritos en este documento fueron incorporados en los mismos y fue posible interrelacionar de forma estrecha la operatividad del campo de colectores con los algoritmos más complejos y evolucionados de un control global de planta comercial.

En esta aplicación, el sistema de control central, SCCH, a pasado de ser un potente ordenador con *interface* gráfica hombre-máquina a ser un ***driver software*** que es encadenado (*linked)* y unido a un sistema comercial de control global de planta, SCGP en donde el campo solar es un elemento más de la planta como lo puede ser la turbina o el receptor solar.

En los SCGP, la configuración de los algoritmos de control empleados para la controlabilidad global de la planta es realizada en un entorno flexible y amigable pudiendo interrelacionar todos los elementos y componentes y mostrar los resultados y los estados del sistema con interfaces de usuario muy potentes y de gran vistosidad.

3 Evaluación

Durante el mes de septiembre de 1999, coincidiendo con el Equinoccio de otoño, una intensa campaña de ensayos ha sido realizada al helióstato autónomo. El objetivo de ésta campaña ha sido validar el actual diseño, conocer su comportamiento real y calcular los rendimientos de

los elementos diseñados expresamente para este helióstato, tales como cargador, unidades de potencia (servos) y radiomodem. Igualmente, con los datos de consumo real, se pretende una optimización del diseño del sistema de autoabastecimiento energético y de los consumos de los diferentes componentes del helióstato.

3.1 Preparación

Durante los meses de junio y julio de 1999 se realizaron los preparativos para la campaña de ensayos del helióstato autónomo. Estos preparativos suponían:

- Equipar al helióstato de sensores externos, como muestra la figura 3.1, para ponerlo en contacto con los agentes meteorológicos, poder medirlos y perfeccionar las rutinas de autoproteción. Para ello fue necesario el diseño de un interruptor especial de viento compuesto por una pletina de acero calibrada y por un pequeño interruptor magnético. Se incorporó igualmente un piranómetro instalado sobre el plano del espejo de la firma Kipp Zonen modelo CM11, un pequeño anemómetro para la medición analógica del viento en la dirección perpendicular al espejo y un sensor de temperatura ambiente compuesto por una pequeña PT100.

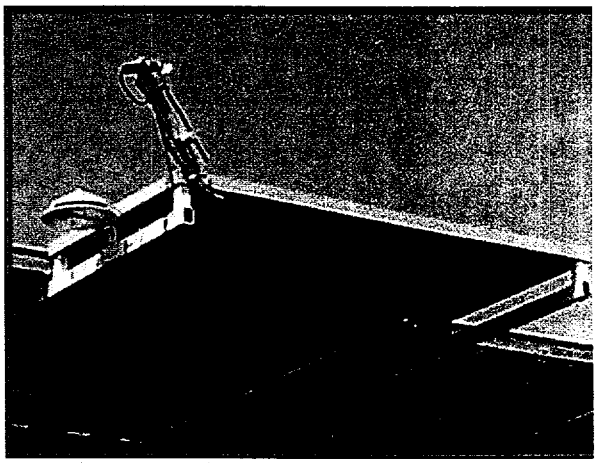

Figura 3.1. *Sensores externos del helióstato*

- Equipar al helióstato de sensores internos para la medición de las tensiones e intensidades más características, con objeto de determinar los consumos eléctricos de los diferentes elementos. Para ello se instalaron *shunts* calibrados.
- Instalar un sistema de adquisición de datos fiables y preciso que recogiera en tiempo real y registrara todas las variables medidas. Para ello fue necesario el empleo de una tarjeta de adquisición especial y de un ordenador PC con un software expresamente realizado para esta aplicación.

- Realizar todo el cableado y conexión de las señales desde el control local hasta la tarjeta de adquisición de datos.
- Acomodar y centralizar todo el cableado y el sistema de adquisición de datos en una caravana situada a unos diez metros del helióstato autónomo en su lado oeste.
- Realizar las pruebas, ajustes y depuraciones finales para la correcta medición y registro de todas las variables.

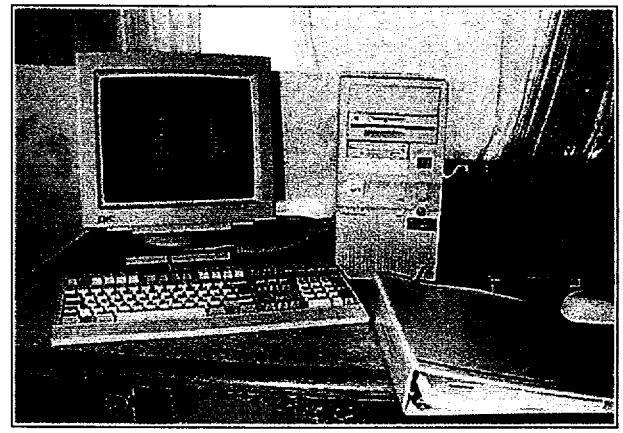

Figura 3.2. *Sistema de adquisición de datos*

Un completo sistema de adquisición de datos ha sido instalado y puesto en funcionamiento para la medición precisa de las variables necesarias. Para ello, como muestra la figura 3.2, ha sido empleada una tarjeta IMP modelo 35951H, de 20 canales analógicos, con un convertidor A/D de 15bits + signo que aporta un error máximo global de $\pm$ 24μV para el rango de 0 a 20mV, con una frecuencia de muestreo de 90 canales por segundo. Todos los datos son adquiridos cuatro veces y media por segundo con objeto de poder evaluar correctamente los consumos intermitentes de los servos y motores durante el seguimiento solar. En este régimen los motores trabajan de forma intermitente en períodos muy cortos de tiempo, por lo que tendrán que soportar picos rápidos de consumo.

La tabla 3.1 muestra una descripción de todas las variables medidas. Todos estos datos son registrados, procesados y almacenados en un ordenador PC situado junto al helióstato en el interior de la citada caravana. Durante el proceso, los datos son adquiridos, convertidos a unidades de ingeniería y registrados en el disco duro cada 23 segundos, lo que aporta un archivo diario de 3740 registros. Los valores de variación rápida (consumo de motores) son integrados en tiempo real con las muestras tomadas cada 0.23 segundos y almacenados en disco. El conexionado y montaje realizado se muestra en la figura 3.3.

Tabla 3.1. Variables medidas en el sistema de adquisición de datos		
	DESCRIPCIÓN VARIABLES	
TA001	Tensión en Panel fotovoltaico	Voltios
IA002	Intensidad generada en el panel fotovoltaico	Amperios
TA003	Tensión de carga de baterías	Voltios
IA004	Intensidad hacia baterías y consumo	Amperios
TA005	Tensión de entrada a servo eje ACIMUT	Voltios
IA006	Intensidad hacia servo eje ACIMUT	Amperios
TA007	Tensión entrada convertidor CC/CC (alimentación electr.)	Voltios
IA008	Intensidad consumida por electrónica	Amperios
TA009	Tensión de entrada a servo eje ELEVACIÓN	Voltios
IA010	Intensidad hacia servo eje ELEVACIÓN	Amperios
TA011	Tensión en motor eje ACIMUT	Voltios
IA012	Intensidad consumida por el m otro ACIMUT	Amperios
TA013	Tensión en motor eje ELEVACIÓN	Voltios
IA014	Intensidad consumida por el m otro ELEVACIÓN	Amperios
PA015	Radiación Global sobre el espejo del helióstato	W/M2
AA016	Velocidad de viento normal al espejo del helióstato	Km/H
IA017	Interruptor de Viento	SI/NO
18-20	RESERVAS	

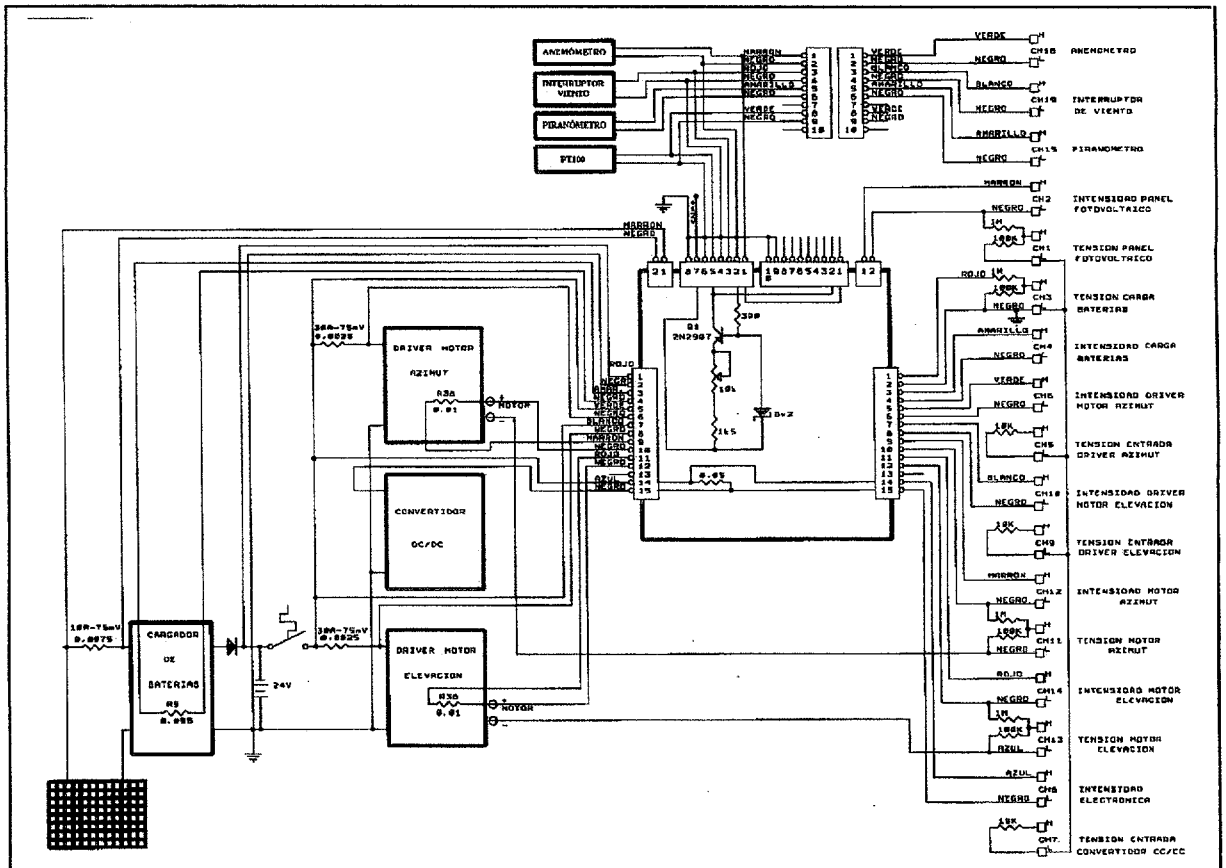

Figura 3.3. *Conexionado y montaje para la evaluación del helióstato autónomo*

3.2 Ciclos programados y movimientos del helióstato.

Para la obtención de datos procedentes del helióstato, éste ha sido programado para realizar por sí solo:

- Ciclos de inactividad (días 3 al 12) para determinar los consumos mínimos y parásitos.
- Ciclos repetitivos de operación orto-ocaso (días 13 al 27) para determinar los consumos reales en operación rutinaria.
- Ciclos con desconexión automática nocturna de consumos innecesarios, **letargo** (días 3 al 20) para determinar el ahorro de consumo originado.

En la figura 3.4 puede apreciarse la secuencia de movimientos realizados por el helióstato en el intervalo más largo estudiado, correspondiente al ciclo de operación rutinaria orto/ocaso.

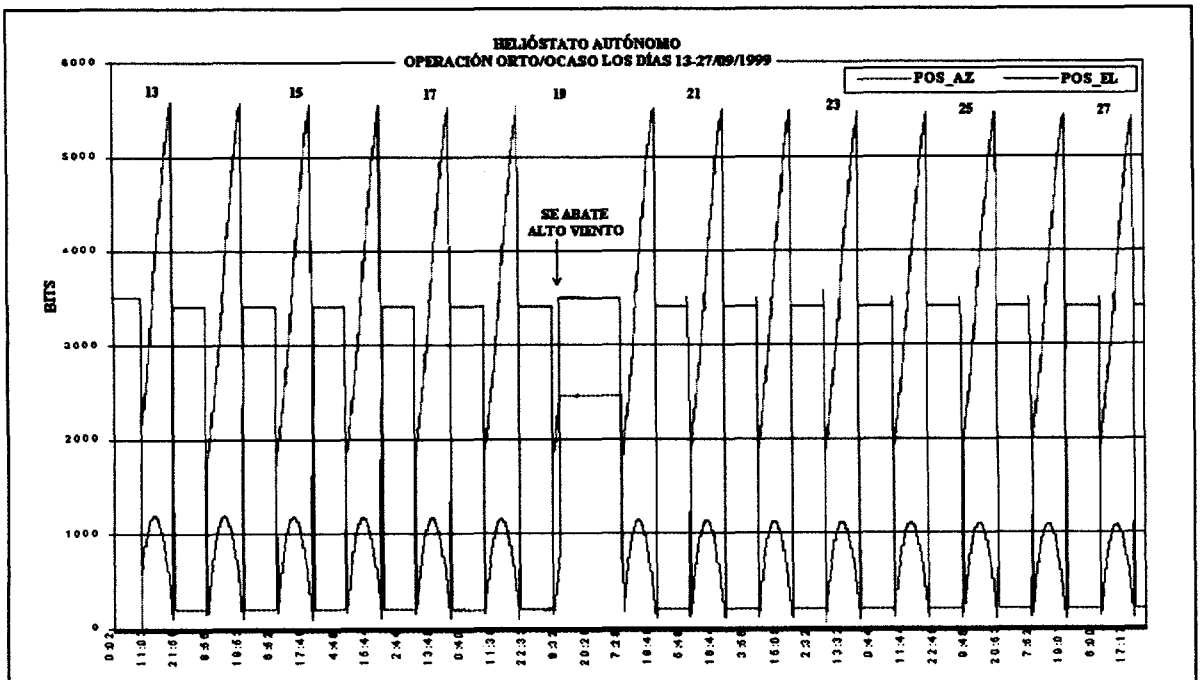

Figura 3.4. *Movimientos realizados por el helióstato durante el período de operación rutinaria*

Se comprueba que el día 19 el helióstato adoptó de forma automática su posición de defensa para su auto-protección, debido al alto viento registrado (>45Km/h).

Las posiciones del helióstato vienen dadas en bits de codificador lo que corresponde, en ambos ejes, a 14400bits por vuelta completa. Un bit corresponderá por tanto con 360/14400,

lo que será igual a 0.025 grados. La posición cero de ambos ejes se establece en: superficie reflectante mirando al este (acimut) y en posición vertical (elevación). La posición de abatimiento se establece en los 200 bits en acimut y 3400 bits en elevación (facetas mirando hacia el este y hacia arriba) y la posición de defensa únicamente determina la posición en elevación con valor 3600 (espejos mirando al cielo), dejando invariable la posición de acimut en el momento de producirse la emergencia.

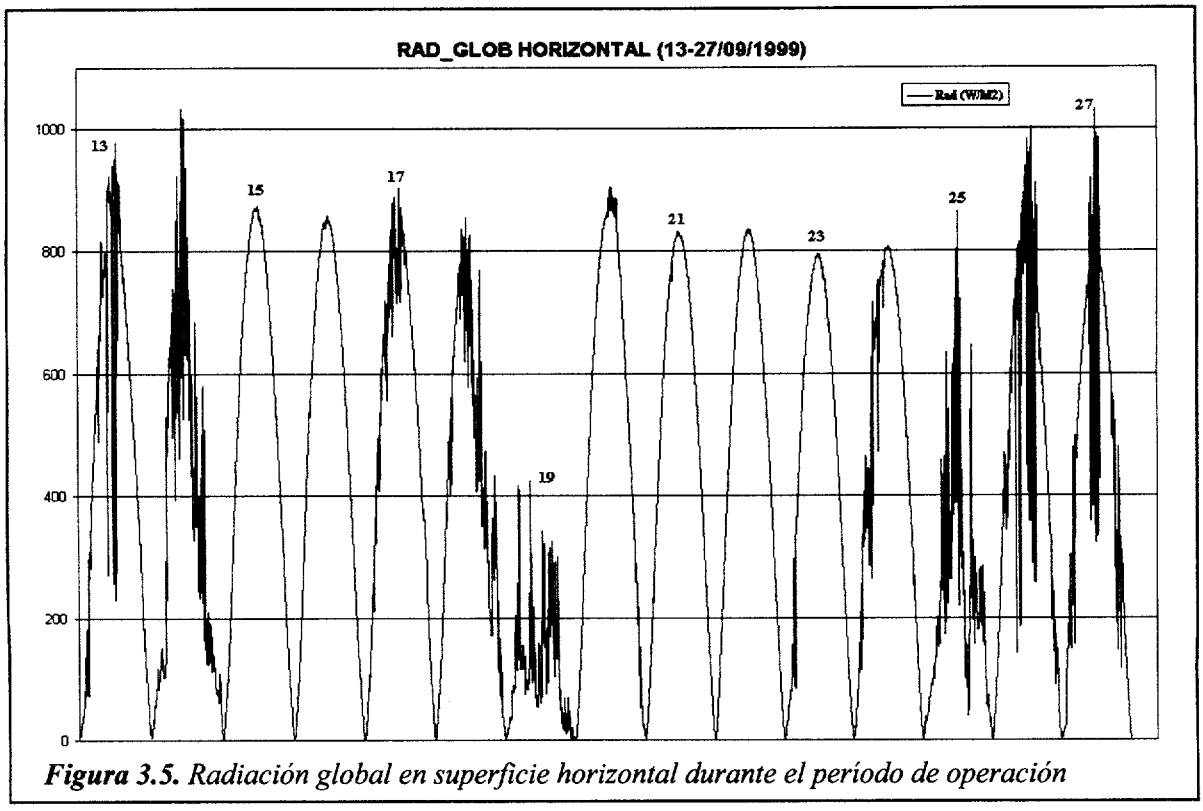

Figura 3.5. *Radiación global en superficie horizontal durante el período de operación*

La figura 3.5 representa las condiciones de luz existentes durante el mismo período. En ella se grafica el valor de la radiación global medida en superficie horizontal obtenida, de la estación meteorológica de la PSA. Se observa una variedad de condiciones climáticas durante este período, registrándose 6 días totalmente despejados (15-16 y 20-23), tres días claros con paso de nubes (17, 18 y 24), 4 días parcialmente cubiertos (13, 14, 26 y 27) y 2 días nublados (19 y 25).

El día 19 fue especialmente interesante ya que, además de haber sido un día totalmente nublado, éste fue ventoso, registrándose rachas de viento superiores a los 56 Km/h. Este día, sobre las 10h de la mañana, el helióstato se abatió automáticamente al detectar velocidades de

viento, en dirección perpendicular al plano especular del helióstato, superiores a 40 Km/h, como así se puede comprobar en la figura 3.6 con valores puntuales tomados cada 23 seg.

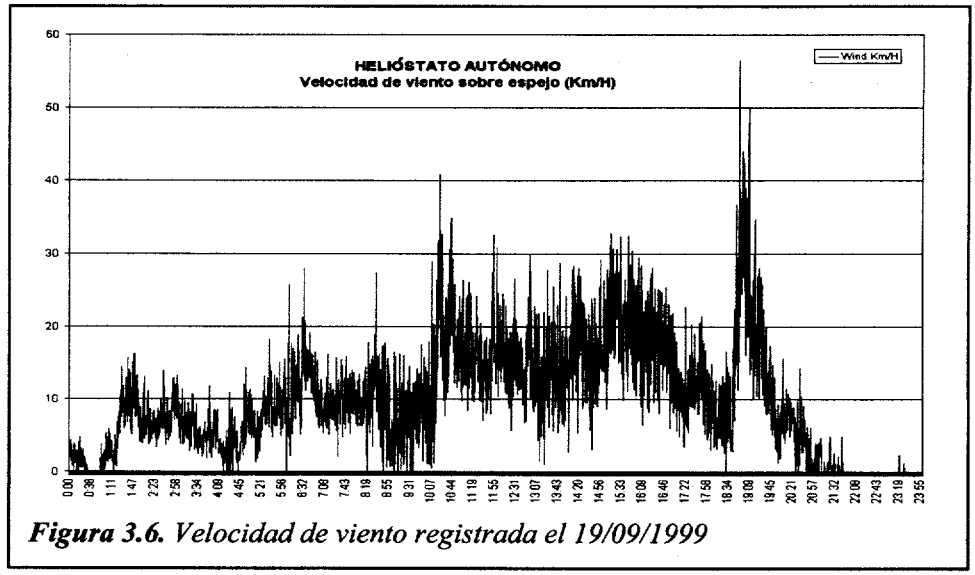

Figura 3.6. *Velocidad de viento registrada el 19/09/1999*

3.3. Consumos reales

Durante estos ciclos se han obtenido los consumos reales ponderados y los datos han sido validados para ciclos suficientemente largos, 15 días de operación rutinaria, mediante la igualdad entre la energía aportada hacia la batería/consumo y la suma de los consumos de los diferentes elementos del helióstato (electrónica y servos) y de las pérdidas por autodescarga y rendimiento en las baterías.

El comportamiento del consumo de los diferentes elementos del helióstato puede observarse en las figuras 3.7 y 3.8. La primera corresponde a un día de operación rutinaria orto/ocaso con condiciones climáticas normales (día claro y sin viento) y la segunda a un día nublado y ventoso, en el que la operación es interrumpida por una emergencia de alta velocidad de viento.

Como puede apreciarse en ambas figuras, en el orto se produce un escalón en los consumos de los servos y motores debido a la subida del helióstato desde la posición de abatimiento hasta la de enfoque. Igual sucede al atardecer, cuando el helióstato baja para buscar su posición de abatimiento.

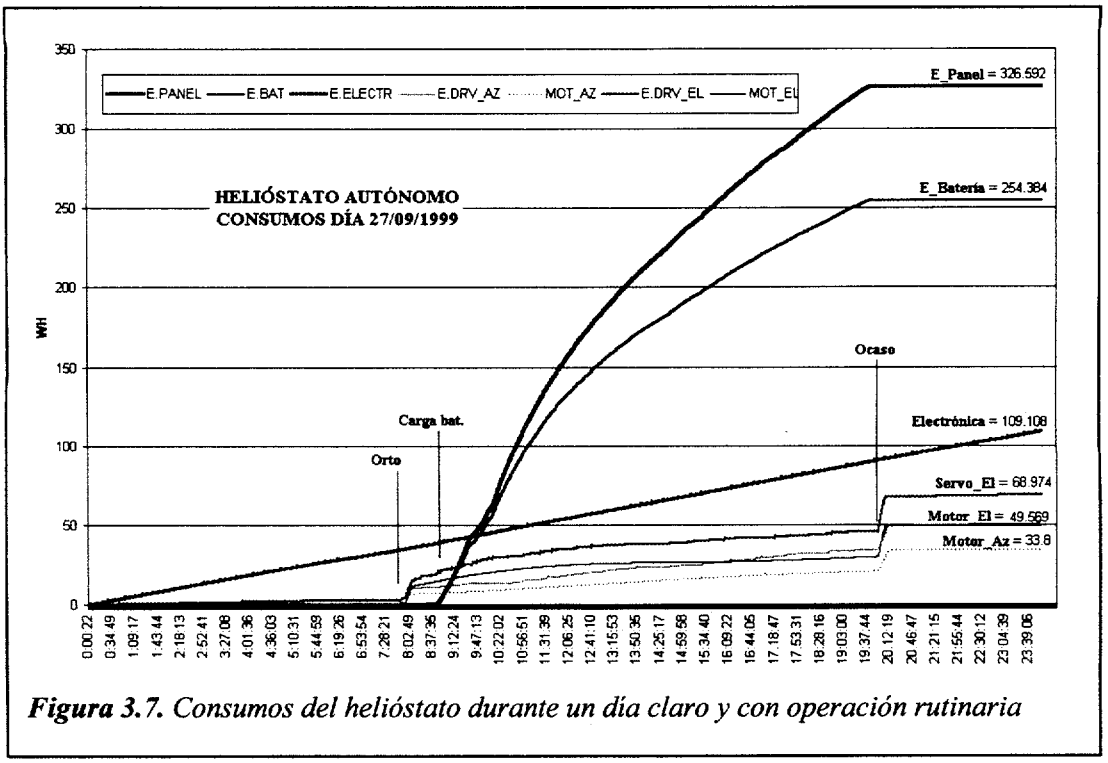

Figura 3.7. *Consumos del helióstato durante un día claro y con operación rutinaria*

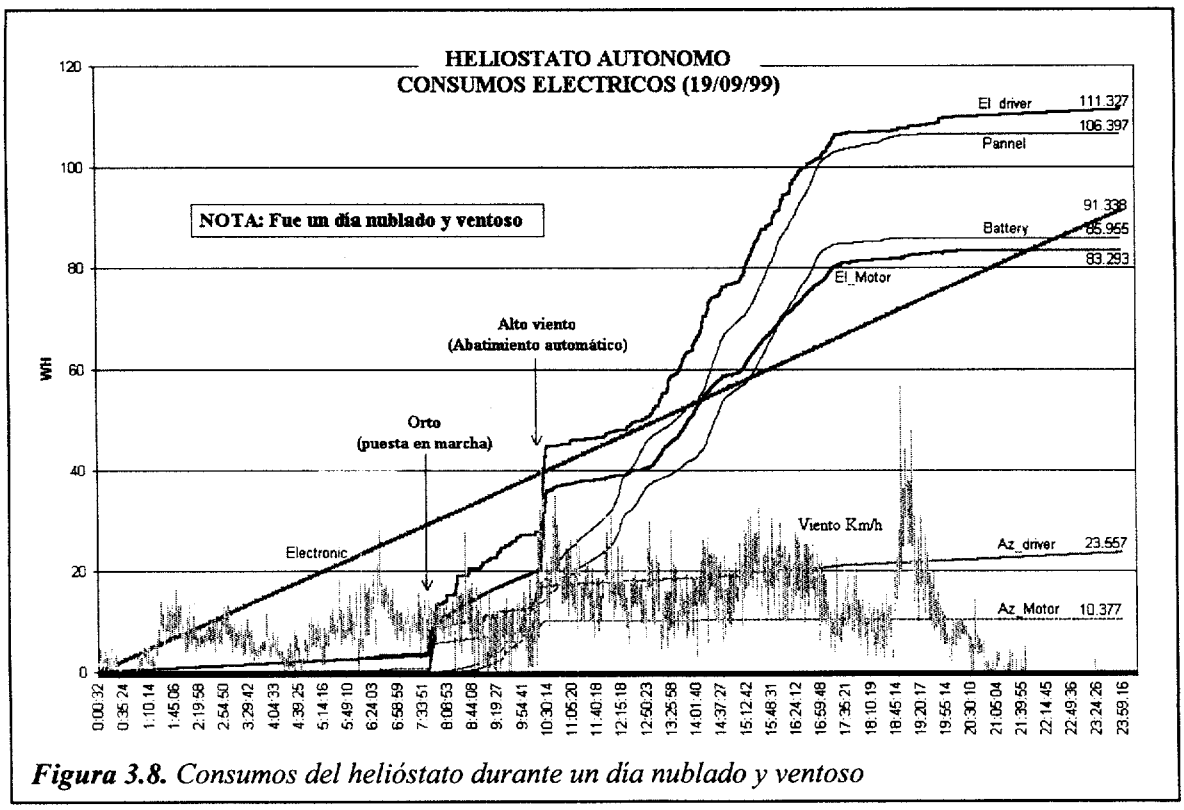

Figura 3.8. *Consumos del helióstato durante un día nublado y ventoso*

Se puede observar en la figura 3.8 que el consumo en el eje de elevación, tanto del servo como del motor, se produce cuando las condiciones de viento son intensas a pesar de estar parado y abatido el helióstato. Esto demuestra que el viento es capaz de mover al helióstato incluso en

su posición de defensa obligando al control a corregir estos desplazamientos mediante continuos movimientos del motor de elevación. Esto se traduce en un consumo adicional manifestado solamente en el eje de elevación del helióstato. En días con condiciones normales de viento este fenómeno no se produce.

Los consumos diarios medidos se muestran en la tabla 3.2. En ella la columna I denominada *Consumo,* se obtiene de las sumas de los consumos diarios medidos en la electrónica y en los dos servos (I = C+D+F). El consumo de cada servo incluye el propio consumo parásito de su electrónica y el consumo del motor.

Tabla 3.2. *Consumos diarios, días 4-27/09/1999*

	E.Panel A	E.BAT B	Electrón C	ServoAz D	MotAz E	ServoEl F	Mot_El G	Vien_med H	Consumo I	Pérd. Bat J	ConsTotal K
	Wh/dia	Wh/dia	Wh/dia	Wh/dia	Wh/dia	Wh/dia	Wh/dia	Km/h	Wh/dia	Wh/día	Wh/dia
	CONSUMOS EN PERIODOS INOPERATIVOS										
4/09/99	195.744	141.476	90.927	12.329	0.000	12.013	0.000	0.649	115.269	11.316	126.585
5/09/99	190.899	139.440	91.287	12.330	0.000	12.013	0.000	0.474	115.630	11.338	126.967
6/09/99	192.618	139.983	91.079	12.337	0.000	12.013	0.000	3.455	115.429	11.326	126.755
11/09/99	197.285	138.982	90.830	13.256	0.000	12.928	0.000	0.244	117.014	11.421	128.435
	CONSUMOS EN OPERACIÓN ORTO-OCASO										
13/09/99	253.361	189.586	90.771	54.190	35.934	54.299	43.525	2.760	199.260	16.356	215.616
14/09/99	282.516	226.501	91.420	59.644	35.110	68.034	50.477	3.717	219.098	17.546	236.644
15/09/99	316.477	243.713	91.622	48.347	33.379	68.680	50.145	2.328	208.649	16.919	225.568
16/09/99	307.877	239.348	91.533	50.000	31.771	67.996	49.658	1.887	209.529	16.972	226.501
17/09/99	306.318	237.482	91.618	49.645	31.491	66.489	49.331	3.402	207.752	16.865	224.618
18/09/99	289.472	222.640	91.533	49.345	33.219	62.814	49.320	3.360	203.692	16.622	220.314
19/09/99	106.397	85.955	91.338	23.557	10.377	111.327	83.293	9.806	226.221	17.973	244.194
20/09/99	469.157	378.677	91.669	60.986	41.133	70.110	50.714	3.316	222.765	17.766	240.531
21/09/99	323.874	249.004	103.498	50.337	35.032	70.487	51.207	0.755	224.322	17.859	242.181
22/09/99	323.166	248.521	110.018	44.340	33.803	70.981	50.515	1.677	225.339	17.920	243.260
23/09/99	316.529	250.073	109.516	52.407	32.562	66.702	49.409	0.463	228.625	18.118	246.743
24/09/99	322.764	258.846	110.910	52.817	31.815	82.087	49.357	2.009	245.814	19.149	264.963
25/09/99	205.200	176.050	110.513	50.020	34.307	65.208	49.984	2.500	225.742	17.944	243.686
26/09/99	365.035	291.121	110.986	53.331	34.348	69.174	50.754	1.768	233.491	18.409	251.900
27/09/99	326.592	254.384	109.108	50.903	33.800	68.989	49.569	2.033	229.000	18.140	247.140

Con objeto de estimar las pérdidas originadas en las dos baterías de ácido/plomo empleadas, de la firma Hoppecke-Energy de 12V y 55AH cada una, se ha considerado una autodescarga mensual del 10% y un rendimiento en ciclos de carga/descarga del 94%. Esta autodescarga puede establecerse en 0.14 mA por AH de acumulación. Con estos datos de partida se obtiene la columna J de la siguiente manera:

Autodescarga diaria = 0.00014 A * 55 AH * 24 V * 24 H = 4.4 Wh/día

Pérdida Batería (J) = Consumo (I) * 0.06 + 4.4

Por último, la columna K recoge el consumo total incluyendo estas pérdidas (K = I+J). Estos consumos finales serán los empleados para la realización, más adelante, del estudio de dimensionado fotovoltaico.

En la tabla 3.3 se muestran los consumos acumulados en el período comprendido entre los días 13 al 27 de septiembre, correspondiente a operación rutinaria orto/ocaso, así como los consumos medios y los valores porcentuales de los mismos.

Tabla 3.3. Consumos en operación orto-ocaso, días 13-27/09/1999

Wh/día	Batería/ consumo	Electrón.	Servo Acimut	Motor Acimut	Servo elevación	Motor elevación	Consumo	Pérdidas Baterías	Consumo Total
Acumul	**3551.90**	1496.10	749.87	488.08	1063.38	777.258	3309.36	264.56	**3573.92**
Media	236.79	99.74	49.99	32.53	70.892	51.81	220.62	17.64	238.26
%		**41.862**	**20.982**	14.749	**29.754**	23.487	92.597	**7.403**	**100**

Las energías medidas y acumuladas desde el día 13 al 27 de septiembre, correspondientes a operación rutinaria orto/ocaso, cumplen la igualdad entre la energía suministrada hacia batería/consumo, **3551.9** Wh, y la energía total consumida incluyendo las pérdidas en las baterías, **3573.92** Wh. La coincidencia de estos dos valores aporta una confianza en las mediciones con un **0.62%** de error, obteniendo un valor de consumo medio, para días de operación rutinaria orto/ocaso, de **238.26** Wh. Este valor medio puede considerarse representativo del consumo del helióstato ya que durante el período considerado hemos tenido la suerte de poder contar con días de condiciones meteorológicas diversas (días claros, nublados y ventosos) producido en las proximidades del equinoccio de otoño.

La figura 3.9 muestra de forma gráfica el reparto porcentual de los diferentes consumos del helióstato en condiciones de operación rutinaria. Se puede observar, y puede resultar paradójico, que los consumos de la electrónica llegan casi a igualar a la energía necesaria para mover al helióstato durante el día. Esto es así ya que hay que tener en cuenta que el trabajo total que realiza el helióstato a lo largo del día se reduce a mover, como mucho, una vuelta

cada eje del helióstato, lo que puede suponer un funcionamiento continuo de menos de 40 minutos en cada motor, frente al consumo que realizan las placas electrónicas las 24 horas del día. Aunque la potencia de la circuitería electrónica es muy baja, del orden de 4.5 vatios (incluyendo radiomodem), el consumo diario se eleva a unos 110Wh.

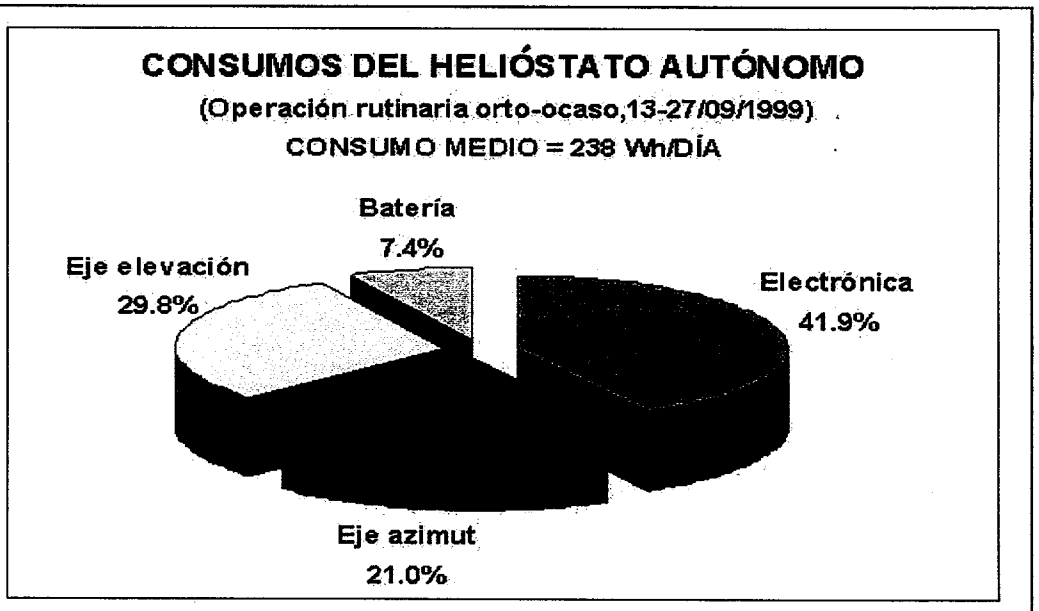

Figura 3.9. *Distribución de los consumos del helióstato en operación rutinaria*

Otro estudio ha sido determinar los consumos efectuados por el helióstato durante un período de días en donde ha estado abatido, sin efectuar movimiento alguno, con la superficie reflectante horizontal y mirando hacia arriba. El conocimiento de estos consumos mínimos es necesario para un correcto dimensionado fotovoltaico y sobre todo para la determinación de los días reales de autonomía en largos períodos nublados.

Para ello la tabla 3.4 muestra los valores acumulados y valores media del período comprendido entre los días 4 al 6 y 11 de septiembre. El período empleado es estrecho (escaso número de días) por no considerar necesario un tratamiento más complejo, debido a la gran repetitividad de los consumos diarios obtenidos.

El balance entre energía suministrada a la batería/consumo y la energía total consumida no es realizado para este período ya que no existen condiciones suficientes de estabilidad en los ciclos de carga/descarga de las baterías.

Wh/día	*Tabla 3.4. Consumos en períodos inoperativos, días 04-06 y 11/09/1999*							
	Electrón.	**Servo Acimut**	**Motor Acimut**	**Servo elevación**	**Motor elevación**	**Consumo elementos**	**Pérdidas baterías**	**Consumo Total**
Acumul	364.122	50.252	0.000	48.862	0.000	463.235	45.394	**508.629**
Media	91.030	12.563	0.000	12.215	0.000	115.809	11.349	127.157
%	**71.589**	**9.880**	0.000	**9.607**	0.000	91.075	**8.925**	**100**

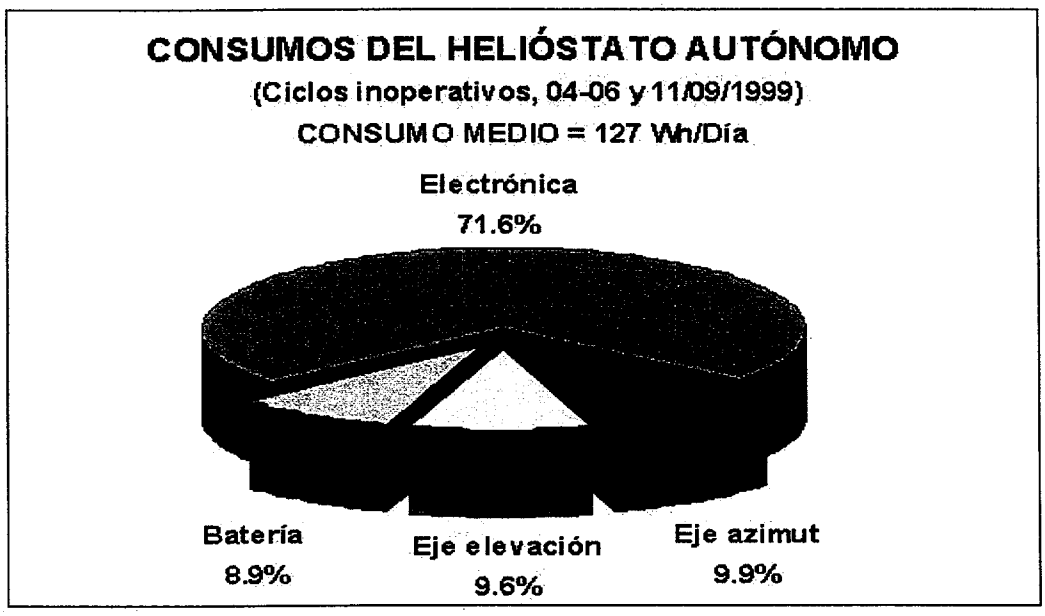

Figura 3.10. *Distribución de los consumos del helióstato en días inoperativos*

Con el objeto de reducir consumos en períodos inoperativos o nocturnos, se ha dotado al helióstato de un procedimiento automático de ahorro energético que desconecta ciertos elementos no vitales en la electrónica. Este procedimiento, al que hemos denominado **letargo,** supone un ahorro de consumo especialmente importante cuando la aplicación requiere poca capacidad de batería o cuando se desea incrementar los días de autonomía en períodos inoperativos con escasa o nula insolación. El consumo de la electrónica, fijo e independiente del tipo de operatividad del helióstato, ha sido medido en 91.4 Wh/día con letargo nocturno y 110.2 Wh/día sin letargo, lo que supone un **20.5%** de ahorro.

Una conclusión importante que extraemos de este análisis es que hay que seguir trabajando para disminuir los consumos de la electrónica, mejorando los procesos de ahorro energético y depurando las estrategias de desconexión nocturna (letargo).

3.3 Rendimientos obtenidos

Ciertos componentes del helióstato autónomo han sido desarrollados expresamente con el objetivo de conseguir altos rendimientos en su funcionamiento. Estos elementos han sido los dos servos para manejar los motores de corriente continua y el cargador de baterías. Es por ello que, durante esta campaña de ensayos, han sido evaluados para determinar sus rendimientos reales.

En operaciones de seguimiento solar estos servos alimentan a los motores a una tensión mucho más baja de la nominal, (7Vcc), durante cortos intervalos de tiempo debido a la escasa distancia angular a mover (0.025º). Ya que en este régimen es verdaderamente difícil la medición de los picos de consumo, se opta por realizar el cálculo del rendimiento en régimen continuo a velocidad nominal (24Vcc). Este régimen se produce a primera o última hora del día cuando el helióstato debe subir o bajar hacia o desde la posición de seguimiento solar.

En la tabla 3.5 se muestran los consumos medidos en los servos y en los motores durante procesos de subida/bajada, en régimen de funcionamiento continuo, a velocidad nominal, así como los rendimientos obtenidos.

Tabla 3.5. *Eficacias de los servos*

	Servo_Az	Motor_Az	μ_Az %	Servo_El	Motor_El	μ_El %
13/09/99	14.528	12.854	0.885	20.713	19.005	0.918
14/09/99	15.646	13.606	0.870	21.768	19.590	0.900
15/09/99	14.842	12.900	0.869	21.622	19.326	0.894
16/09/99	14.007	12.318	0.879	20.375	18.940	0.930
	59.023	51.678	**0.876**	84.478	76.861	**0.910**

Los datos obtenidos experimentalmente confirman un mejor comportamiento en el eje de elevación, con un rendimiento medio del **91%**. Al ser los dos servos idénticos, la razón del menor rendimiento en el eje de acimut se debe a razones constructivas y de ajuste.

Ambos servos, en períodos inoperativos (motores parados), muestran un consumo parásito de algo más de 12 Wh/día debido a la alimentación de su electrónica. Estos consumos podrían

ser eliminados desconectando totalmente los servos en el procedimiento de letargo, circunstancia que no se realiza en la actualidad.

El cargador de baterías aporta un rendimiento que depende del ciclo de carga de la batería, como puede comprobarse en la figura 3.11 la cual nos indica la evolución del proceso de carga registrado el día 20/09. El rendimiento medido, en un ciclo óptimo de carga por debajo de la tensión de recorte establecida en 27.3 voltios, oscila entre el **85 y el 90.5%.**

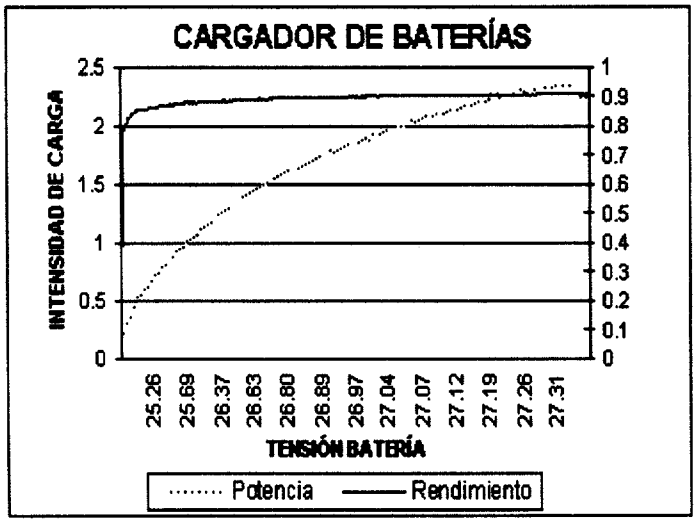

Figura 3.11. *Curva de eficiencia del cargador de baterías*

El cargador ha sido especialmente diseñado para conseguir cargar la batería con valores muy bajos de insolación con objeto de aprovechar el máximo posible de radiación difusa en los días nublados. El umbral en donde comienza el aporte positivo a la batería se ha medido en los **25W/m^2** para una tensión de batería de 25.2Voltios.

3.4 Sistemas de seguridad

El día 19 de septiembre el helióstato autónomo, de acuerdo con sus rutinas de autoprotección, decidió su abatimiento de forma automática al detectar vientos intensos, sobre su superficie especular, superiores a los 45Km/h. Los dos sensores dispuestos a tal efecto, un anemómetro y un interruptor especial de bajo coste, fueros sensibles a tal evento registrando rachas de viento de 56 Km/h.

El interruptor de viento ha sido un elemento expresamente diseñado para este helióstato, con una gran sencillez y robustez en su concepción. Su bajo coste lo hacen utilizable en aplicaciones aisladas o de campos de helióstatos en Plantas de Torre Central. Está constituido por una pletina flexible de acero y de un pequeño interruptor magnético.

3.5 Incremento de captación solar

Otro dato de interés, que ha sido medido en esta campaña de ensayos, ha sido la radiación global sobre la superficie especular del helióstato con objeto de determinar la radiación real interceptada por la placa fotovoltaica cuando éste trabaja en operación rutinaria orto-ocaso. Este estudio se realiza con las condiciones operativas del helióstato autónomo tales como:

- Campo con situación (torre): latitud norte = 37.099893 y longitud oeste = -2.3598219
- Helióstato situado a una distancia de la torre de 383651mm en la línea Norte-Sur (eje Y), 21809mm hacia el este en la línea Este-oeste (eje X) y a 5998mm de altura en la vertical.
- Operación orto ocaso al blanco situado a X = 0mm, Y= 6524mm, Z= 34165mm en el sistema de referencia definido en el punto anterior.

Ya que el helióstato no realiza un seguimiento normal al sol, es importante saber qué incremento de energía se consigue, con respecto a la horizontal, aprovechando los movimientos diarios de los dos ejes del helióstato. Para ello se ha instalado, junto a la placa fotovoltaica, un piranómetro sobre el plano especular del helióstato y han sido registrados los niveles de radiación captados durante los días 13 al 27 de septiembre. Estos datos han sido comparados con los obtenidos para ese mismo período en el plano horizontal. La radiación global acumulada, incidente sobre el plano del helióstato en operación orto-ocaso, ha sido de **110.116** KW/m^2/día frente a los **78.695** KW/m^2/día captados en el plano horizontal, lo que supone un incremento medio del 40%. Estos datos, junto con los valores calculados de *Horas pico de Sol*, son mostrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. *Horas pico medias de sol.*

	S. Horizontal		**Seguimiento orto-ocaso**		
13-27/09/99	Energía W/m^2/día	Horas pico de sol	Energía W/m^2/día	Horas pico de sol	Consumo
ACUMUL	78695.28		110115.59		3573.858
MEDIA	5246.352	**5.251**	7341.039	**7.348**	**238.257**

En días claros se obtiene experimentalmente que este incremento aumenta, incluso por encima del 50%. La tabla 3.7 nos indica el porcentaje de incremento de captación en los diferentes

supuestos. Para superficies orientadas hacia el sur e inclinadas 37° (valor de latitud del lugar), se considera un incremento del 20% (valor obtenido de tablas para superficies inclinadas).

Tabla 3.7. Incremento de captación solar

	SEGUIM.ORTO-OCASO		POSICIÓN FIJA	
DÍAS 13-27/09/1999	Día claro	Media	37° SUR	S. Horizontal
Incremento de Captación	**1.5**	**1.399**	**1.2**	**1**

3.6 Diseño fotovoltaico optimizado

Una vez obtenidos los consumos reales del helióstato se puede realizar un dimensionado optimizado del sistema fotovoltaico. Para ello se establece un margen en el cálculo de la potencia de panel necesaria definido por las potencias calculadas para dos regímenes de funcionamiento. El primero, considerando la energía real captada en el plano horizontal y el segundo, la captada sobre el espejo en operación rutinaria de seguimiento orto-ocaso.

Tabla nº 3.8. Márgenes de diseño fotovoltaico

	Margen de diseño		diseño actual	
Pot. Panel = Consumo medio día / Horas Pico Sol medio	**45.370**	**32.424**	110	Wp
Tensión de trabajo	24			Volt
Capac. Bat = Consumo med.día * Días autonomía/ tensión	**49.637**	**19.855**	55	AH
DIAS DE AUTONOMÍA PARA OPERACIÓN RUTINARIA ORTO-OCASO (o número de movimientos de subida-bajada en ambos ejes)				
Sin ningún aporte solar (base de diseño)	5	2	**5.540**	
Días nublados operativos (R_difusa media = 100W/m^2)	**5.762**	**2.213**	**8.160**	
DIAS DE AUTONOMÍA PARA PERIODOS INOPERATIVOS				
Sin ningún aporte solar	**9.4**	**3.7**	**10.379**	
Días nublados (R_difusa media = 100W/m^2)	**12.5**	**4.6**	**26.043**	

Una vez calculados los vatios pico necesarios de panel fotovoltaico procedemos a calcular la capacidad necesaria de baterías en un margen establecido por dos supuestos. El primero: operación orto-ocaso con 5 días de autonomía sin ningún aporte solar y el segundo idem para sólo 2 días. Los datos obtenidos se recogen en la tabla nº 3.8.

Como puede observarse, los días de autonomía se incrementan de forma sensible si se tiene en cuenta la producción de energía eléctrica gracias al aporte de la radiación difusa existente en días nublados. Así, con el panel de 110Wp instalado actualmente, se consigue cargar en la

batería, en el plano horizontal, 76.5 Wh/día un día nublado considerando una radiación media de sólo 100W/m^2 durante 12 horas. Con datos reales, el valor medio de la radiación global registrado el día 19 de septiembre (día cubierto) fue de 114.3 W/m^2 y el valor registrado de energía que pudo cargar la batería ese día fue de 85.9 W/h (ver figura 3.8). Para paneles del mismo número de células y diferentes potencias existe una relación proporcional tal y como se refleja en la tabla 3.9.

100W/m2	PFV 110wp	PFV 45Wp	PFV 32Wp
Intensidad	0.25	0.103	0.075
Tensión	25.5	25.5	25.5
Potencia	6.375	2.627	1.913
E.Bat(12h)	**76.5**	**31.518**	**22.95**

Tabla 3.9. *Energía acumulada en día nublado*

3.7 Radiomodem

El radiomodem es un elemento que ha sido desarrollado expresamente para esta aplicación permitiendo una comunicación semiduplex, con velocidades de transmisión de 9600 ó 4800 bits/segundo y canalización de radio en banda estrecha. La frecuencia de funcionamiento está situada en la banda de 400 a 434 Mhz o en la banda 868 a 870 Mhz, normas nacionales: UN-29, UN-30 y UN-39 del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias.

Este elemento no ha sido objeto de evaluación en esta campaña, correspondiendo este trabajo al período de pruebas que serán realizadas al final del año 2000 con un campo de unos 20 helióstatos autónomos. Unicamente podemos decir que el funcionamiento del radiomodem, durante esta campaña de ensayos, ha sido totalmente satisfactorio, comunicando al helióstato con la sala de control situada a unos 400m de distancia.

4. Costes

Los costes del helióstato ligados al concepto de autonomía son únicamente los relativos a la placa fotovoltaica, baterías, radiomodem e interruptor de viento. Para que el concepto "Helióstato Autónomo" pueda implantarse en las futuras plantas solares es necesario que estos costes compitan en ventaja con aquellos que serían suprimidos tales como:

- Costes de obra civil (canalizaciones, zanjas, arquetas, explanaciones, conducciones...).
- Costes de equipamiento eléctrico (cableados de fuerza, cableados de comunicaciones y amplificadores, protecciones eléctricas, elementos de conmutación, armarios de distribución, registros eléctricos, cajas de interconexionado...).
- Costes de seguridad (protecciones contra rayos y descargas eléctricas, sistemas de alimentación ininterrumpida, SAI, grupos electrógenos, codificadores absolutos, supervisión constante...).
- Costes informáticos (ordenadores más potentes en el control central del campo).

El extra coste real del helióstato autónomo puede valorarse como se recoge en la tabla 4.1. Para ello se dimensiona el sistema fotovoltaico cerca del margen inferior del estudio mostrado en la tabla 3.8. consiguiéndose, para el helióstato autónomo, una autonomía de 3 días de operación orto-ocaso y de cerca de una semana para períodos inoperativos en los que el helióstato no se mueve pero mantiene todos sus componentes alimentados y operativos.

Tabla nº 4.1. *Costes asociados al concepto de "Helióstato Autónomo"*

	Precio unitario	**Cantidad**	**Total ($70m^2$)**
Placa fotovoltaica	750pts/Wp	$0.5Wp/m^2$ espejo	26250
Batería y cargador(24V)	450pts/AH	25AH	11250
Radiomodem y antena	55.000pts	1	55000
Interruptor de viento	2.500	1	2500
			95000pts

Los costes, asociados al concepto de "Helióstato autónomo", tienen que competir con los costes convencionales indicados con anterioridad. Los datos más recientes sobre este tema son los realizados para la planta de 10MW, denominada PS10 (Fernández, 2000). Esta planta constituye actualmente la iniciativa española más firme, la cual estará compuesta por un campo de unos 1000 helióstatos de 90 m^2 cada uno. Los costes de obra civil asociados al cableado han sido estimados en un millón de dólares, lo que nos confirma que, actualmente, ya se puede pensar que el empleo de campos helióstatos autónomos es un concepto rentable que puede incluso hacer más competitivas a las plantas solares de un futuro próximo.

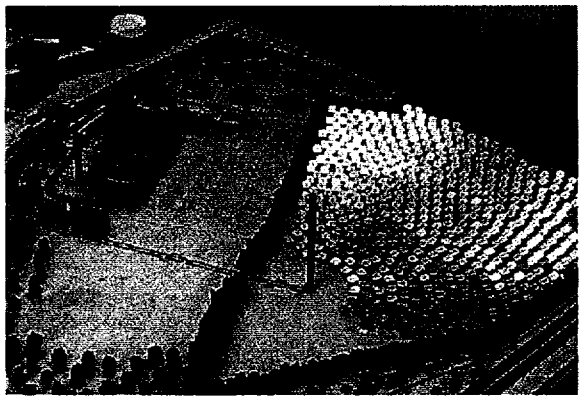

Figura 4.1. *Planta COLON Solar (maqueta)*

Otra referencia en el mismo sentido, que viene a coincidir con la anterior, es el coste en obra civil que fue barajado para la Central Colón Solar en el año 1998. Este proyecto, liderado por la Compañía Sevillana de Electricidad, pretendía la reconversión de la antigua Central Térmica Cristóbal Colón en Huelva, ver figura 4.1, para admitir un aporte solar producido por un campo compuesto por 489 helióstatos de $70m^2$ cada uno. Los datos reales obtenidos de esta iniciativa fueron:

Capítulo 1. Obras Civiles

(zanjas, cimentaciones, arquetas, tubos...) 23,2 Mpts

Capítulo 2: Canalizaciones y conducciones

(Cables, bandejas, tuberías, herrajes, tornillería, racoraje...) 26,5 Mpts

Capítulo 3: Cuadros y equipos eléctricos

(Cuadro de B.T., SAI, grupo electrógeno, protecciones,...) sin valorar

El coste que el concepto de autonomía podría suponer para este campo sería de 46,4 millones de pesetas, cantidad inferior a la suma de las dos partidas correspondientes a los capítulos 1 y 2 valorados.

Está claro que, si estos datos ofrecidos por INABENSA por un lado y por Sevillana de Electricidad por otro son ciertos, los campos de helióstatos autónomos tendrán un futuro esperanzador.

5. Conclusiones.

Los datos de costes convencionales, que nos aportan nuestros colegas de la empresa española INABENSA, perteneciente al grupo ABENGOA, para su planta PS10, son datos muy

esperanzadores para el asentamiento, en un futuro próximo, de los conceptos establecidos en este documento. Es muy importante conocer con exactitud estos costes ya que el estudio comparativo puede confirmar un ahorro importante con el empleo de helióstatos autónomos frente a los convencionales. INABENSA, empresa líder en el sector industrial andaluz, dedicada precisamente a montajes de ésta u otra índole, aporta el dato del coste convencional de forma precisa, fiable y seria, situándolo en torno a los 11.1 dólares por metro cuadrado de espejo frente a los 8.1 dólares necesarios en el concepto autónomo. Este dato nos aporta un ahorro mayor al 30% empleando los conceptos indicados.

El empleo de helióstatos autónomos supone el hermanamiento de dos tecnologías solares que, hasta ahora, habían tenido aplicaciones y singladuras muy dispares, la solar térmica de concentración y la energía fotovoltaica. El lanzamiento conjunto de ambas tecnologías supone un mayor atractivo y ofrece una mayor garantía de éxito.

El ahorro energético originado por el aporte de energía producida por las placas fotovoltaicas tendrá que unirse a la aportación total de la planta solar. Esto se traducirá en una reducción de los consumos de energía internos de la planta, lo que provocará un aumento del rendimiento global de las instalaciones.

Por otro lado, en el actual proceso estatal de protección a la producción de electricidad mediante energías alternativas[9], podrían ser aplicables, para campos de helióstatos autónomos, las primas establecidas para la producción eléctrica debido al aporte fotovoltaico. Ya que la prima ofrecida por cada kilovatio eléctrico producido mediante energía fotovoltaica se establece en 60pts/KWh (para instalaciones menores de 5KW), a gran diferencia de las otorgadas a otras tecnologías solares, la planta solar en su conjunto podrá beneficiarse total o parcialmente, si no se demuestra lo contrario, de esta protección. Esto puede introducir un atractivo adicional y animar a las empresas españolas a relanzar el empleo de los conceptos detallados en este documento en las futuras plantas de Torre Central.

Los datos obtenidos en esta campaña de ensayos podrían sin duda mejorarse aún más ya que todavía hay mucho que hacer para optimizar los consumos del helióstato autónomo.

[9] El Real Decreto 2818/1998 de fecha 23 de diciembre, publicado en el BOE número 312 siete días más tarde.

Aunque puede resultar paradójico, efectivamente, la circuitería electrónica consume casi tanto como la energía necesaria para mover los ejes del helióstato. Hay que tener en cuenta que las energías netas consumidas por los motores en un día de operación son muy pequeñas ya que el trabajo realizado se limita a un giro de, como mucho, 180º(subir) + 90º(bajar) en los ejes del helióstato. Por otro lado, hemos hecho un esfuerzo de diseño para la obtención de altos rendimientos (>90%) en los elementos de potencia, lo que implica una optimización importante del consumo de potencia. También hay que tener en cuenta los niveles tan pequeños de consumo que estamos manejando. El consumo global del helióstato, en un día de operación rutinaria, podría asemejarse al realizado por una bombilla doméstica de 60W encendida tan sólo 4 horas.

En cuanto al consumo de la electrónica hay que advertir que, aunque la potencia es pequeña, (4.5W), el consumo se produce durante las 24 horas del día, lo que supone un consumo diario de unos 110Wh. En estos están incluidos los consumos propios de la electrónica de la placa de control, de los codificadores, de la radio y del modem y están incluidas las pérdidas de conversión de 24 a 5Vcc (no está incluido el consumo de la electrónica de los servos). El objetivo del letargo es disminuir en lo posible estos consumos. Para ello, en períodos nocturnos son desconectados los codificadores por ser elementos cuyo su consumo es significativo (esto supone un ahorro diario de un 20% de 110 a 90 W/h).

El consumo de la electrónica es importante a la hora de optimizar o disminuir al mínimo la capacidad de las baterías en un campo de helióstatos autónomos. Para ello hay que considerar la premisa de que sólo se opera el campo cuando hay radiación suficiente para que el aporte del receptor al proceso sea positivo. De esta manera, los días operativos de autonomía se pueden reducir aún más, de 1 a 3, y la batería será solamente dimensionada para atender los picos de consumo de los motores y/o los consumos de la electrónica en días nublados (7 días serán suficientes para la mayoría de los casos).

Aunque se ha hecho un esfuerzo en la optimización de los consumos de la electrónica, éste, a nuestro juicio, debe continuar haciéndose ya que hay verdaderas posibilidades de reducción. Para ello sería muy interesante seguir trabajando en el tema ya que hay ideas tales como:

- Reducción de la circuitería de la placa de control (una placa más optimizada de bajo coste como la que recientemente hemos diseñado para el helióstato SanLúcar90 de Inabensa).
- Mejorar el procedimiento de letargo con una mayor desconexión nocturna sin perjudicar la disponibilidad operativa.
- Mejorar los consumos de la radio ya que ésta queda actualmente en recepción nocturna.
- Emplear procedimientos de ahorro de energía establecidos por los fabricantes de microprocesadores.
- Revisión del diseño para la eliminación de consumos parásitos y conseguir, si cabe, mayores eficacias.

Como puede observarse, los servos presentan un consumo en su electrónica continuo e independiente de la operación del motor. Estos consumos significan unos 12Wh/día por servo. Efectivamente, estos consumos podrían ser eliminados durante períodos nocturnos o inoperativos circunstancia que actualmente no ser realiza.

Una de las conclusiones importantes que se extraen de este estudio es que el diseño fotovoltaico del helióstato autónomo estaba sobredimensionado como así era de esperar. Solamente cuando se han medido los consumos reales del helióstato es cuando se ha podido ajustar este diseño, pudiéndose hablar ya de la necesidad de medio vatio pico de energía fotovoltaica, en estas latitudes, por metro cuadrado de espejo (para helióstato <= $70m^2$). Teniendo en cuenta el precio actual del vatio pico fotovoltaico, podríamos decir que únicamente estaríamos incrementando en 1000pts el precio de una faceta de $3m^2$ de espejo.

La batería es otro elemento que se puede minimizar considerablemente pudiendo llegar, en futuros diseños, al empleo de baterías muy pequeñas. Este hecho podría favorecer, aunque fuera a costa del precio, el empleo de acumuladores de mayor calidad, con una vida muy superior a las baterías de plomo y con mayores índices de respeto al medio ambiente y mejores posibilidades de reciclado.

El mayor esfuerzo ahora es optimizar la comunicación sin hilos. Para ello debemos de reducir los consumos de la radio con técnicas de ahorro energético y los costes de los radiomodem.

Otro factor importante es desarrollar protocolos de campo que permitan un control ágil y seguro del campo de helióstatos autónomos. Esto es técnicamente viable, como demuestra el gran avance que han experimentado las radiocomunicaciones en los últimos años y que han hecho posible el empleo masivo de teléfonos móviles.

6. Referencias.

García, G. (1995). "Technical development of a new stand-alone heliostat field control". SolarPACES Technical Report TRIII-4/95, June 1995.

García, G.; Egea, A.; Gázquez, J.A. (1996). "Desarrollo de un nuevo control para seguimiento solar". Energia Solar e qualidade de vida - VIII Congreso Ibérico de Energía Solar, pp 469-474. Oporto, may,96

Monterreal, R., Romero, M., García, G. and Barrera, G. (1997), "Development and testing of a 100 m^2 glass-metal heliostat with a new local control system". Solar Engineering 1997, pp. 251-259, Eds. D.E. Claridge and J.E. Pacheco, ASME, New York.

García G., Egea A. and J.A. Gázquez (1999), "Stand-alone heliostat", Proc. of the 13th Task III Meeting within IEA SolarPACES on Solar Technology and Applications, Kibbutz Shefayim, Israel; SolarPACES Tech. Report No. III-2/99, Eds. M. Becker and J. Kaluza, DLR, Köln, Germany, pp. 43-53.

Silva M., Blanco M., Ruiz V. (1999), "Integration of solar thermal energy in a conventional power plant: The COLON SOLAR project", Journal de Physique IV, Symposium Series, 9, Pr3-189-194.

Fernández, V. (2000), INABENSA, Sevilla, Spain, Private communication.

García G., Egea A., y Gázquez J.A. (2000), "El Helióstato Autónomo", IX Congreso Ibérico de Energía Solar. III Jornadas sobre Biomasa, Córdoba 27-29 de marzo de 2000.

García G., Egea A., Gázquez J.A. and Romero M. (2000), "The stand-alone heliostat firt operation results", Renewable Energy for the New Millenium Conference Sydney, March 8-10, 2000.