

RESUMEN

El presente trabajo se refiere al diseño e implementación de un dispositivo microcomputarizado ideado para seguir la trayectoria del sol en distintas coordenadas geográficas. De este modo se consigue una máxima eficiencia en los colectores fotovoltaicos. El sistema está basado en un microcomputador dedicado y consigue el seguimiento controlando los ángulos de acimut y elevación del heliostato. La rutina principal utiliza un detector óptico de la posición del sol, existiendo además una rutina de respaldo, para días nublados u ocultamiento temporal del sol, que consigue el seguimiento mediante el cálculo de coordenadas.

INTRODUCCION

La creciente demanda de energía, se duplica cada 20 años, el carácter agotable de las fuentes tradicionales hace evidente la necesidad de desarrollar nuevas fuentes de energía. Entre estas últimas la energía solar, por su limpieza y carácter prácticamente inagotable, resulta ser una buena alternativa (1).

De los estudios realizados a la fecha es posible concluir que en lo que a generación de electricidad se refiere, especialmente por métodos fotovoltaicos, la eficiencia, de por sí baja, aumenta si los colectores poseen movimiento heliostático, es decir, cuando se consigue incidencia normal de los rayos solares sobre el colector. En la actualidad la gran mayoría de los heliostatos disponibles comercialmente poseen movimiento alrededor de un sólo eje (normalmente elevación). Ahora bien, dado que el sol tiene variaciones de posición estacionales tanto en acimut como en elevación es que no es posible obtener en estos dispositivos una incidencia perfectamente normal de los rayos solares y por tanto no se aprovecha al máximo la potencialidad del colector.

Con el propósito de analizar la alternativa de un heliostato con seguimiento en ambos ejes es que se construyó este prototipo.

1.- EL HELIOSTATO CONSTRUIDO

La Fig. 1 muestra la estructura del prototipo construido con sus diferentes partes constitutivas.

1.1.- FUNCIONAMIENTO Y CONTROL DEL SEGUIDOR SOLAR

El sistema implementado sigue la rutina que se muestra en la Fig. 2.

Dado que el sol varía su posición muy lentamente es que es suficiente en este caso una rutina de control del tipo discontinuo. Ahora bien, la distinta naturaleza de los errores de acimut y elevación en ambos modos de seguimiento hace que sean necesarias características de control un tanto distintas para cada caso.

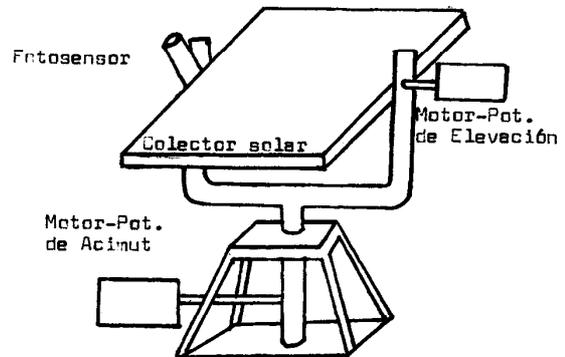


FIG.1. Estructura del prototipo.

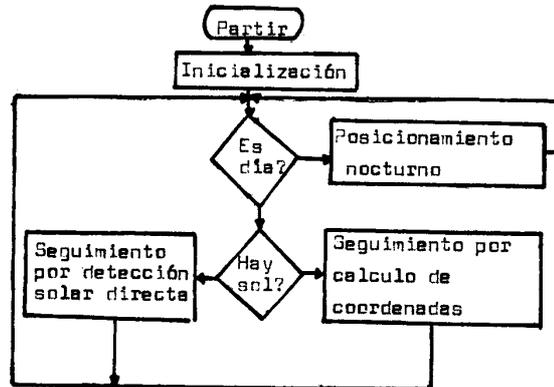
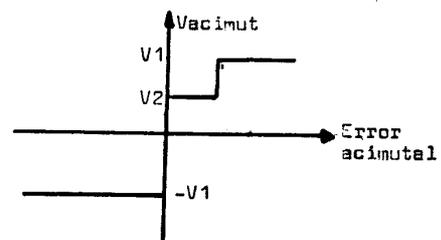


FIG.2. Diagrama de la rutina principal.

1.1.1. SEGUIMIENTO POR RADIACION SOLAR DIRECTA

El seguimiento en este caso se consigue por medio de la detección de la posición solar. El sensor utilizado genera señales proporcionales a la diferencia entre la orientación de los rayos solares (S) y la del panel (P). Estas señales, convenientemente transformadas, son utilizadas para generar las señales de corrección necesarias. En la Fig. 3 se muestran las características de control consideradas.



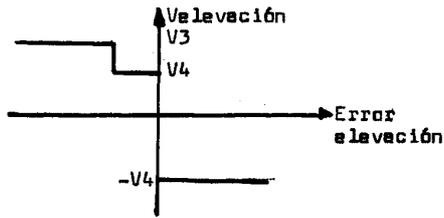


FIG. 3. Características de control para el seguimiento directo.

1.1.1.1. EL FOTOSENSOR

Este sensor consiste en un tubo, internamente oscurecido de color negro para evitar reflexiones y exteriormente blanco para evitar la absorción de calor, en cuya base se encuentran 4 fotodiodos dispuestos en cuadratura (2). Así la diferencia de tensión entre los diodos FD1-FD2 y FD3-FD4 será proporcional a los errores de posición del panel tanto en acimut como en elevación.

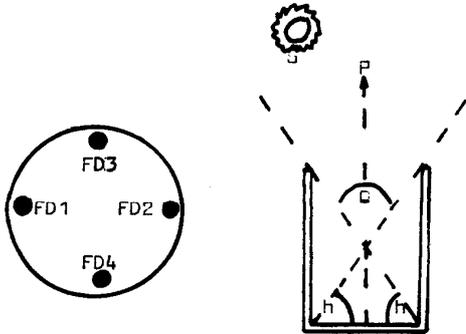


FIG. 4. Esquema del detector solar y distribución de los fotodiodos.

1.1.2. SEGUIMIENTO POR CALCULO DE COORDENADAS DEL SOL

En esta modalidad la posición angular del panel es tomada por dos potenciómetros de posición adosados a los ejes de rotación de la estructura. Estas señales son comparadas con la referencia, previamente determinada por una subrutina de cálculo astronómico de la posición del sol, dando origen a un error de posición del heliostato. Procesando estas señales de error, y utilizando las características de control de la Fig. 5, se generan las señales de corrección necesarias.

Las características de control en este caso son similares a las utilizadas en el seguimiento directo con la única salvedad de que en este caso después del mediodía se produce un cambio de signo en el error acimutal, hecho que debe ser tomado en cuenta.

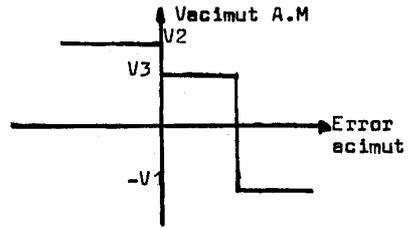
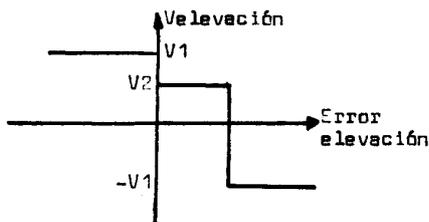


FIG. 5. Característica de control para el seguimiento por cálculo de coordenadas.

1.1.2.1. CALCULO DE COORDENADAS SOLARES

Es posible obtener las coordenadas solares si se conoce la latitud del lugar y el ángulo horario. Con estos datos es posible obtener los ángulos de acimut (A) y elevación (E) a partir de las siguientes relaciones:

$$\text{Sen } E = \text{Sen } L \text{ Sen } D + \text{Cos } L \text{ Cos } H \text{ Cos } D \quad (1)$$

$$\text{Sen } A = \text{Cos } D \text{ Sen } H / \text{Cos } E \quad (2)$$

En donde:

- L = Latitud del lugar
- H = Ángulo horario
- D = Ángulo dependiente de parámetros temporales

Un cálculo suficientemente exacto fue realizado por Robert Walraven (3), programa mediante el cual es posible obtener la posición del sol con 0.01° de precisión. Este algoritmo basa sus cálculos en la hora universal, referida al meridiano de Greenwich, razón por la cual hubo de ser modificado para entregar la posición respecto a la hora solar media.

2. EL MICROCOMPUTADOR DEDICADO

En la Fig. 6 se observa un diagrama en bloques del computador dedicado utilizado

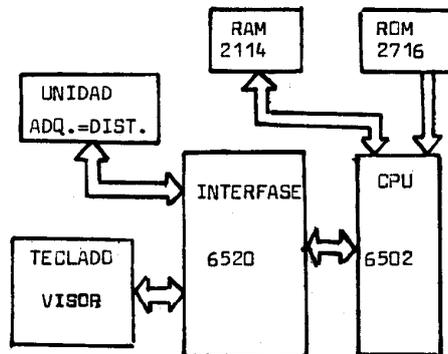


FIG. 6. Esquema del computador dedicado.

El microcomputador elegido fue el Rockwell 6502 el cual presenta ciertas ventajas en este caso especialmente en lo que se refiere a

ciclo de instrucción, largo de palabra, capacidad de direccionamiento y formato de instrucciones.

La unidad almacenadora está compuesta por memorias RAM del tipo 2114, necesarias para la inicialización de parámetros de posición geográfica y para datos de operación de las rutinas con control, además de memorias del tipo ROM 2716 para el almacenamiento de los programas.

2.1. SISTEMA DE ADQUISICION Y DISTRIBUCION DE DATOS

Con el objetivo de comunicar el microcomputador con la periferia es que se necesita un sistema de adquisición y distribución de datos.

Puesto que el sistema para su operación requiere cuatro datos análogos (tensión de fotodiodos y potenciómetros) es que se utilizó en este caso un sistema de adquisición tradicional consistente en multiplexores análogos, del tipo CD 4051, en conjunto con un conversor A/D bipolar del tipo ADC 0804.

La adquisición es comandada por el procesador el cual selecciona el canal a leer direccionando los multiplexores por medio del BUS de CONTROL.

En cuanto a la distribución, y dado que el seguidor utiliza rutinas del tipo Todo-Nada, se necesita distribuir sólo algunos valores puntuales de control. Es por ello que se implementó en este caso una unidad de distribución un tanto más simple que la tradicional. La idea consiste en tener un conjunto de tensiones de actuación disponibles las cuales son seleccionadas por el microcomputador comandando la acción de un par de multiplexores. El esquema utilizado se muestra en la Fig. 7.

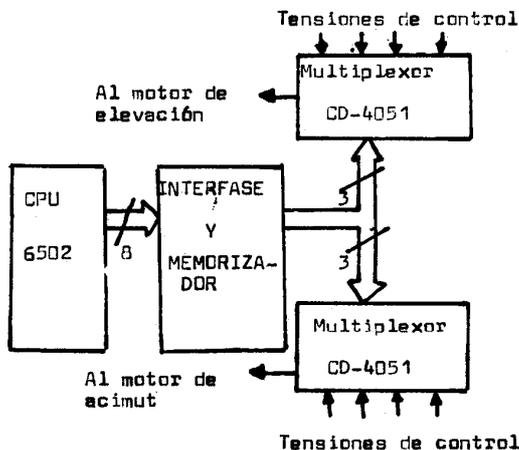


FIG.7. Diagrama de sistema de distribución.

3. PROGRAMACION DEL COMPUTADOR

El sistema de seguimiento posee un conjunto de programas mediante los cuales se logra un eficiente control del heliostato. Entre ellos se pueden mencionar los siguientes:

- a.- Programa Monitor o Sistema Operativo el cual se encarga de la coordinación de las distintas tareas.
- b.- Programa Actualizador, necesario para

la actualización de la hora solar utilizada en el cálculo de las coordenadas solares.

- c.- Programa de cálculo de las coordenadas solares.
- d.- Programa de control de heliostato.
- e.- Programa de posicionamiento nocturno, mediante el cual se determina la hora y posición de salida del sol del día próximo; con estos datos se ejecuta una rutina de posicionamiento y espera de la salida del sol.

3.1. EL PROGRAMA MONITOR

Este es el programa central y es el que se encarga de coordinar las distintas tareas efectuadas por el computador. En su parte de atención a teclado ofrece, mediante comandos previamente establecidos, la ejecución de algunas operaciones de chequeo de información y cambio de variables. Es así que al activarse esta rutina se ofrece al usuario la opción a los siguientes comandos:

- COMANDO A : Ingreso de datos de latitud, hora solar, etc.
- COMANDO B : Chequeo de localidades de memoria.
- COMANDO C : Chequeo de funcionamiento de subprogramas.

La atención de esta subrutina de atención a teclado opera fuera de línea y para su ejecución es necesario activar la línea de RESET del procesador.

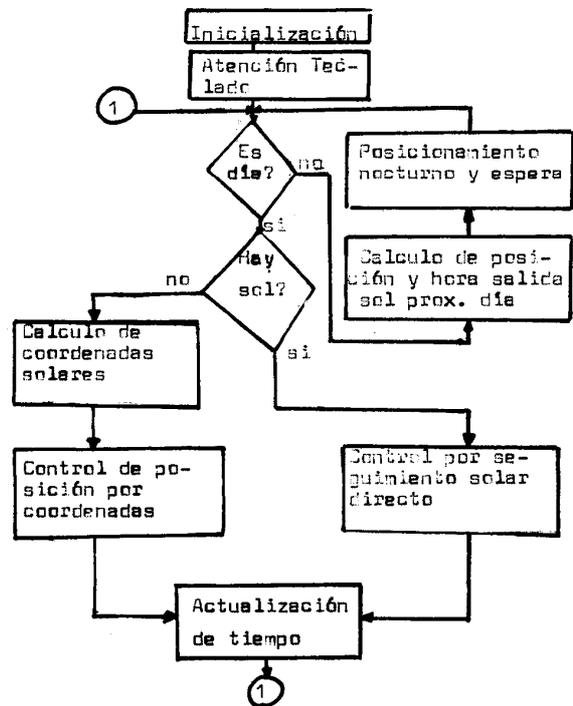


FIG.8. Diagrama de programa monitor.

3.2. SOFTWARE DE APOYO

La ejecución de las diferentes rutinas requiere de una serie de operaciones matemáticas tales como la suma, resta, división, multiplicación y cálculo de funciones trigono-

nométricas. Con este objeto fue diseñado un conjunto de subrutinas de apoyo las cuales se caracterizan por realizar una serie de cálculos matemáticos con bastante exactitud.

El sistema de seguimiento requiere de una gran exactitud; es por ello que se utilizó un sistema de representación en punto flotante, el cual permite representación bastante exacta tanto de los números enteros como los decimales. En el caso presente se comprobó que para obtener la exactitud deseada es necesario utilizar 24 "bits" de mantisa y 8 "bits" de exponente; logrando con ello cálculos matemáticos con precisión hasta la cuarta cifra decimal.

3.2.1. SUBRUTINAS MATEMATICAS

El sistema posee 5 rutinas matemáticas de apoyo, todas ellas trabajan en punto flotante. Estas rutinas son:

- a. Rutina de normalización.
- b. Rutina de multiplicación.
- c. Rutina de división.
- d. Rutina de suma y resta.
- e. Rutina de funciones trigonométricas: Seno, Coseno, Arcocoseno.

La rutina de normalización tiene por misión el representar todos los números en un formato preestablecido; ello ayuda a minimizar el error inherente a la presentación en punto flotante. En el caso de este trabajo se utilizó el método de desplazar la mantisa de modo de lograr un "1" o un "0" después del bit signo, dependiendo el usar uno u otra representación de si el número es positivo o negativo.

En cuanto a las rutinas trigonométricas ellas son necesarias para el cálculo de las coordenadas solares. En este caso se utilizó un desarrollo en series de potencia para su evaluación. La lentitud relativamente grande del sistema a controlar permite utilizar este tipo de rutinas iterativas de por sí más exactas.

4. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El sistema implementado fue diseñado de tal forma que permite una gran flexibilidad en cuanto a que el sistema puede ser puesto en marcha en cualquier punto geográfico. Sólo necesita definir una pequeña cantidad de parámetros dependientes todos ellos de la posición geográfica. Además, la unidad de teclado y visores fue implementada de forma desmontable; ello se traduce en una ventaja cuando se quiere controlar un elevado número de heliostatos, especialmente en lo referente a costos y ahorro de energía.

La posición del sol no sufre variaciones significativas en un intervalo de tiempo de 3 minutos (aproximadamente 1°), razón por la cual se puede pensar en un intervalo de muestreo largo. Sin embargo, cabe destacar que dado que se utiliza una rutina de control del tipo discontinuo es que existe un compromiso entre el error de puntería e intervalo de control. Atendiendo a estas razones es que se utilizó un intervalo de muestreo de 20 segundos, lográndose con ello un error de posición menor a un grado en ambos modos de seguimiento. Adicionalmente, y puesto que el algoritmo total ocupa alrededor de 2 segundos, esta selección permite el control, con el mismo microcomputador, de un número mayor de heliostato. Para lograr lo anterior sólo habría que hacer los ajustes

necesarios en la etapa de adquisición y distribución de datos además de realizar algunas modificaciones leves en los programas.

El error de puntería tiene una fuerte relación con el número de niveles de discretización del sistema de adquisición. Este error disminuirá si se cuenta con canales de adquisición de mayor resolución.

En una primera etapa se ha establecido una comparación entre un sistema de recolección fotovoltaico estático, orientado 45° hacia el norte, y el prototipo construido. En ambos casos se utilizó un colector fotovoltaico de 35 watt (ARCOSOLAR) (4), obteniéndose una oferta de 243 W/M² para el caso estático y 354 W/M² en el sistema construido. Ello significa un aumento en la eficiencia del orden del 45.68%.

Finalmente cabe destacar que el dispositivo construido puede fácilmente ser utilizado en seguimiento para plantas termosolares. Para ello basta con cambiar el software de orientación por otro que haga incidir los rayos solares, reflejados por un espejo, sobre el colector térmico de una torre central. Es así que utilizando las leyes de reflexión y refracción es posible plantear que para conseguir tal propósito se debe reorientar el espejo de acuerdo a los siguientes ángulos:

$$F = (E + \text{Tg}^{-1}(H/d)) / 2 \quad (3)$$

$$T = (A + \text{Sen}^{-1}(d/L)) / 2 \quad (4)$$

En donde:

- A = Angulo de Acimut
- E = Angulo de Elevación
- H = Altura de la torre
- d = Distancia base torre-base heliostato
- L = Distancia colector torre-heliostato
- F = Angulo orientación elevación
- T = Angulo orientación acimut

En ambos casos la idea es conseguir que el espejo tome un ángulo igual a la bisectriz respecto a la diferencia de ángulo entre el colector de la torre y la posición del sol(5).

BIBLIOGRAFIA

1. PALTZ, W. "Electricidad solar: Estudio económico de la energía solar" UNESCO, 1978.
2. PEÑA J., LOPEZ A. "Sistema de seguimiento del sol por cálculo de coordenadas basado en un microprocesador" Mundo Electrónico N° 968, 1980.
3. WALRAVEN, R. "Calculating of the position of the sun" Solar Energy Vol. 20 pp 393-397, 1982.
4. ARCOSOLAR, Manuales.
5. NEVILLE, R.C. "Solar Energy Conversion: The Solar Cell" Elsevier, 1978.

CRUTCHIK NORAMBUENA, MARCOS, nació en Concepción, Chile, el 11 de noviembre de 1951. Obtuvo el título de Ing. Civil Electrónico en la Universidad Técnica Federico Santa María en el año 1976. En 1977 ingresa a la Universidad del Norte en calidad de académico jornada completa, lugar en donde labora en la actualidad. Como resultado de su labor académica en investigación han surgido diversas publicaciones en congresos y seminarios, llegando a publicar en 1983 un texto "Control de Procesos" con el patrocinio de la Universidad del Norte.