

ALTERNATIVAS NO TRADICIONALES PARA ENERGIZACION DE UN PUEBLO
DE LA PRECORDILLERA ANDINA, ZONA NORTE DE CHILE

Crutchik Norambuena, Marcos Ing.
Universidad del Norte
Antofagasta - Chile

RESUMEN

El presente estudio pretende hacer un análisis de la factibilidad de utilizar soluciones energéticas no tradicionales para los pueblos de la precordillera andina de la Zona Norte de Chile. El trabajo centra su ámbito en un pueblo tipo de la zona, Ollague, haciendo para él un análisis de la demanda y de la potencia ofertada por las alternativas solar fotovoltaica y eólica. Además se dimensionan y especifican algunos de los aspectos relacionados con la utilización de estas fuentes no tradicionales.

INTRODUCCION

Uno de los problemas de Chile, en especial de los pueblos de la precordillera andina de la zona norte, es el relativo abandono de las zonas rurales con la consiguiente presión demográfica sobre las áreas urbanas. Entre las causas de tal situación es factor determinante el no poseer estos una infraestructura energética adecuada, lo cual les impide a estos pueblos el consolidar un desarrollo armónico más acorde a las aspiraciones de sus habitantes (1).

Las especiales características de los pueblos de esta zona, traducidas en excelentes índices de radiación (promedios de 300 W/M^2) y en buenas características eólicas, unidas al desarrollo de equipos de mediana y alta potencia, tanto solares como eólicas, comercialmente viables hacen pensar que es posible utilizar en estos pueblos una solución energética del tipo no tradicional (1,2).

1. CARACTERISTICAS RELEVANTES DE OLLAGUE

La comunidad de Ollague se encuentra ubicada sobre el Salar de Chiguana, zona correspondiente a una depresión en la Cordillera de los Andes. Su ubicación geográfica es latitud $21^{\circ}13' \text{ S}$, longitud $68^{\circ}17' \text{ W}$ a una altura promedio de 3700 metros sobre el nivel del mar, a 180 Km. de la ciudad de Calama y a 135 Km. de la subestación más cercana.

Desde el punto de vista climático la zona de Ollague se encuentra en la región Plano Climático Alto Andino, la cual se caracteriza por una temperatura media anual cercana a los 6°C , con escasas precipitaciones y por poseer una elevada evaporación.

La población estimada en el último censo fue de 253 habitantes constituidos en 61 grupos familiares. Además, según datos del mismo censo Ollague presenta un crecimiento demográfico de carácter recesivo, llegando a ser igual a -0.42% en el período 1970-1982.

1.1. ANTECEDENTES METEOROLOGICOS

En este punto se presenta la estadística disponible correspondiente al área de Ollague. Esta información ha sido obtenida del proyecto CHI-69-535 y de datos disponibles en el Departamento de Ciencias Físicas de la Universidad del Norte.

a. Fluviometría: El promedio de agua caída

en los últimos 4 años observados es de $155,4 \text{ mm/año}$, lo cual caracteriza a la zona como poco lluviosa.

b. Temperatura: La temperatura promedio anual es de 5.8°C , existiendo dos épocas bien definidas respecto a la temperatura; un invierno frío con mínimas de -27°C y máximas de 15°C y luego un verano con mínimas de 0°C y máximas de 25°C .

c. Humedad relativa de aire: El ambiente es muy seco con una humedad media de alrededor de un 35% , lo cual prácticamente no produce corrosión en los metales.

d. Radiación Solar Global (RSG): La zona de Ollague cuenta con los promedios de radiación solar más altos del norte de Chile, alrededor de 130 W/M^2 . Además la variación de RSG entre verano e invierno es 2:1 (una de las más bajas del mundo) existiendo un promedio de 92% de días claros en el año.

e. Velocidad del viento: Se estima una velocidad promedio anual de 12 M/s con máximas de alrededor de 150 Km/H .

2. ANALISIS Y PROYECCION DE LA DEMANDA

La tarea a abordar es expresar la demanda en términos de capacidad instalada. Se debe determinar por tanto la energía que se ha de proveer y la capacidad de la planta a instalar.

Las viviendas, y construcciones, en Ollague por lo general no son de grandes dimensiones siendo aplicable a todas ellas la norma SEGTEL que indique que deben proyectarse circuitos de 6A por cada 70 m^2 , o fracción, de superficie construida. Edificaciones que superen esta magnitud son escasas en Ollague y sólo en algunas excepciones se necesitará circuitos de amperaje mayor.

Revisando el plano de distribución urbana de Ollague, de acuerdo a datos recogidos en la municipalidad, sumando la demanda actual y futura se determina que la potencia total a instalarse es de 113.556 Kw de la cual el 34.3% corresponde a demanda comercial y el resto a demanda residencial. La carga anterior es afectada por los factores de demanda y diversidad. En este estudio se utilizarán factores de diversidad iguales a 3.4 y 1.5 para la demanda residencial y comercial respectivamente y factores de demanda 0.5 para el caso residencial y entre 0.5 y 0.6 para el caso comercial. Ahora bien, aplicando los factores respectivos y sumando los resultados se obtiene que la carga a instalar es igual a 44.25 Kw .

De acuerdo a los mismos antecedentes anteriores es posible aproximar una Curva de Demanda Diaria para Ollague, la cual ilustra sobre la variabilidad inherente de la carga (2).

3. ANALISIS Y DESARROLLO DE ALTERNATIVAS

Previo a entrar en el análisis de las alternativas es importante precisar que el tamaño del mercado y la disponibilidad de recur

Los de inversión, amén a los posibles problemas tecnológicos son factores que limitan en este caso la proposición de soluciones como la nuclear, termosolar, etc. Es por ello que se consideraran en este caso sólo las alternativas solar-fotovoltaicas y eólica.

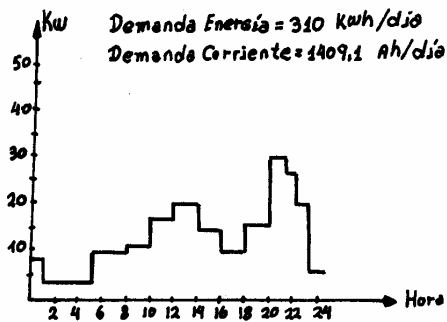


FIG. 1. Curva de Demanda típica para Ollague.

3.1. CENTRAL FOTOVOLTAICA

El sol es una planta nuclear que genera potencia en forma de energía radiada del orden de 3.8×10^{23} Kw, de los cuales aproximadamente 110×10^{12} Kw llegan a la tierra lo que en el mediodía de un día claro representa alrededor de 1 Kw/M^2 .

En la Fig. 2 se observa un esquema de una central fotovoltaica en donde la unidad de control es la encargada de gobernar las características del sistema además de vigilar la carga de la batería. A su vez las baterías se incorporan para proveer la energía eléctrica evitándose así el problema nocturno y el de los días nublados; para lo cual se debe incluir cierta capacidad de reserva.

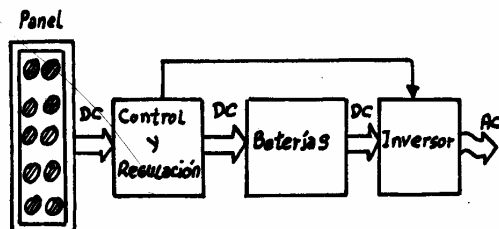


FIG. 2. Esquema de una central fotovoltaica.

En cualquier método y dimensionamiento de un sistema electrosolar deben considerarse dos variables básicas; estas son las curvas de radiación y los requerimientos de la carga. Estos últimos deben especificarse en términos de tensión, normalmente 220 volts efectivos, y de corriente en Ah/día (1427.3 Ah/día en este caso). Otro factor importante a considerarse es el ángulo de inclinación óptimo del arreglo solar, es decir el ángulo para el cual se consigue la mayor potencia promedio anual. Este ángulo resulta ser igual a la latitud del lugar con una orientación hacia el norte. Sin embargo esta elección implica grandes diferencias verano/

invierno de captación de energía, siendo la captación en el invierno comparativamente baja lo cual implica grandes sistemas de almacenamiento de baterías, los cuales quedan totalmente sobredimensionados en el verano. Se recomienda por tanto incrementar este ángulo en 5 a 15° logrando con ello mayor captación en el invierno en desmedro de algunos excedentes de energía en el verano. En el caso de Ollague el ángulo resultó ser igual a 36° (aproximadamente la latitud más 15°).

3.1.1. AREA DE RADIACION REQUERIDA

Se realizará en esta sección un cálculo estimativo del área de paneles requerida para obtener los 50 Kw demandados. Para ello se considerará la curva de Radiación Solar Global Mensual de la Fig. 3 (2, 3) y un rendimiento de panel del orden del 10% . Si bien este rendimiento es un poco más bajo que el usual, el considerarlo redundará margen de seguridad adecuado.

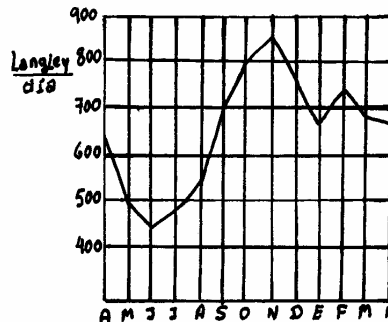


FIG. 3. Distribución de la RSG para Ollague.

De acuerdo a estos datos la radiación promedio en Ollague es de 640 Langley/día ($310,68 \text{ W/M}^2$) lo que arroja un rendimiento de 31 W/M^2 de potencia efectiva. Luego para obtener 50 Kw se requiere un arreglo solar estático de 1613 M^2 . Lo anterior sin considerar los rendimientos de las baterías e inversor ni la separación que debe existir entre los módulos fotovoltaicos para evitar sombreados. Incluyendo estos aspectos el área físicamente requerida resulta ser del orden de los 2000 a 2500 M^2 .

Los gráficos de radiación solar suelen convertirse, para simplificar los cálculos, en horas máximas. Es decir, el número de horas equivalentes de radiación estándar (1 Kw/M^2). Esta conversión se consigue multiplicando el gráfico en Langley/día por 0.0116 . En el caso de Ollague ello redundaría en 7.4 horas de funcionamiento nominal, lo que indica que el arreglo solar satisfará ampliamente los requerimientos de energía, pues se obtienen 370 Kwh/día .

3.1.2. BALANCE EN ENERGIA

Si bien las cifras anteriores son ilustrativas siempre es conveniente hacer un balance de energía, para un día tipo, entre la potencia demandada por los usuarios y la potencia ofertada por el sistema fotovoltaico. Para realizar tal comparación se tomó como referencia un día de junio por ser este el mes en que se presentan los menores índices de radiación solar.

De las curvas de la Fig. 4 se observa que la potencia generada a ciertas horas no sólo -

cubre eficientemente la demanda, sino que también genera lo suficiente para cargar el banco de baterías obteniéndose así una energía de reserva para satisfacer la demanda nocturna y a aquella que se produce en los períodos de baja radiación. Además de las mismas curvas se desprende que la energía ofertada (314 Kwh/día) es levemente mayor que la energía demandada (310 Kwh/día), razón por la cual, y puesto que este es uno de los peores casos, se puede inferir que el arreglo determinado cubre perfectamente la demanda prácticamente en toda condición.

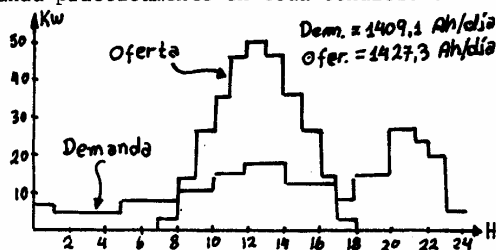


FIG. 4. Balance de energía para un día de Junio, Ollague.

3.2. CENTRAL EOLICA

El aprovechamiento de la energía eólica es tan atractivo en este caso como el de la energía solar fotovoltaica. Este recurso eólico es limpio y renovable y en realidad constituye otra de las manifestaciones de la energía solar (aproximadamente el 1% de la energía solar incidente). La energía eólica se produce por gradientes de temperatura y consiste básicamente en la energía cinética transportada por la masa de aire que se desplaza por la superficie de la tierra y es interceptada por las aspas de un aerogenerador.

Existe una gran variedad de máquinas eólicas capaces de extraer energía eléctrica útil del viento; entre ellas se destacan las de eje horizontal y las de eje vertical. De estos dos tipos las de eje horizontal han resultado ser las de mayor eficiencia, razón por la cual serán las consideradas en este trabajo.

La potencia eléctrica (4,5) extraíble de un generador eólico está dada por:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta V^3 \quad (1)$$

En donde:

- ρ = Densidad del aire (aprox. 1.22 Kg/M^3)
- A = Área barrida por las aspas.
- C_p = Coeficiente de rendimiento mecánico.
- η = Coeficiente de rendimiento eléctrico (aprox. 0.9).

En 1927 Betz demostró que el máximo rendimiento mecánico, C_p , es igual a 0.593. Sin embargo para todo efecto práctico de dimensionamiento de la central eólica puede considerarse igual a 0.35.

3.2.1. EVALUACION DEL RECURSO EOLICO

En realidad el viento no es una fuente de energía confiable día a día, sin embargo presenta estadísticas de comportamiento similares año a año. Es por ello que cualquier estudio de esta naturaleza debe suponer un período de mediciones de velocidad del viento de por lo menos un año.

El primer problema que se plantea es el elegir el lugar adecuado en donde instalar el aerogenerador. No existe un criterio fijo al respecto y la mejor manera de soslayar el problema es el realizar mediciones en varios sitios a la vez con el fin de detectar el lugar en donde se producen las mayores, y de mayor permanencia, velocidades del viento. Para el caso de Ollague este sitio resultó estar a 400 M hacia el norte del pueblo, en donde se obtuvo una velocidad promedio anual de 6.23 M/S a 4 M. Haciendo un cálculo tentativo se concluye que, a esta velocidad e instalando la turbina a esta altura, se necesitarían aspas de un radio mayor a 4 M. En vista de lo anterior es que se debe pensar en instalar la turbina a una altura mayor. Para tal efecto se debe considerar la ecuación (2) en donde V_0 e H_0 son la velocidad y la altura conocidas, V y H los valores a conocer y D es un parámetro que depende de las características del terreno; D toma valores entre 0,10 (terreno llano) y 0,40 (terreno montañoso), lo que arroja variaciones de H/H_0 entre $(H/H_0)_{\min} = 1.87$ y $(H/H_0)_{\max} = 12.49$. Para mayor seguridad se considera un promedio ponderado de estos factores, ecuación (3), y por tanto es posible demostrar que para una altura de 35 M se obtendrá una velocidad promedio de 8 M/S, lográndose con ello condiciones más favorables para la instalación del aerogenerador.

$$V/V_0 = (H/H_0)^D \quad (2)$$

$$H/H_0 = \min + 2/3 (\max - \min) \quad (3)$$

Tomando en cuenta los antecedentes anteriores y las mediciones de velocidad de viento (2) efectuadas es que se obtuvo la siguiente Curva de Duración de Vientos:

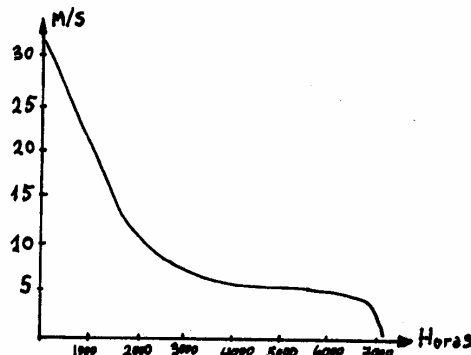


FIG. 5. Diagrama de Duración de vientos.

A partir de esta curva es posible obtener la Curva de Duración de Potencias, necesarias para evaluar el potencial eólico y dimensionar el aerogenerador, dada por $q = f(H) = V^3$.

3.2.2. DIMENSIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR

En la zona de Ollague existen vientos máximos de 150 Km/H, por tanto el aerogenerador tendrá que tener una velocidad de sobreviviencia igual o mayor a 41.67 M/S. Además, se considerará una velocidad de arranque, velocidad mínima de funcionamiento del aerogenerador, igual a $V_p = 2.5 \text{ M/S}$ un valor bastante común en los generadores de estas potencias.

Referente a la velocidad nominal o de regulación, V_r , cabe destacar que esta constituye uno de los parámetros claves en el dimensionamiento pues la potencia eléctrica dis-

ponible por metro cuadrado depende directamente de la elección de su valor. Para su elección se utilizará el Criterio de Fateev el cual recomienda para velocidades promedio de 8 M/S se debe elegir velocidades de regulación entre 10 y 14 M/S. En este caso se optó por un $V_r = 11.5$ M/S.

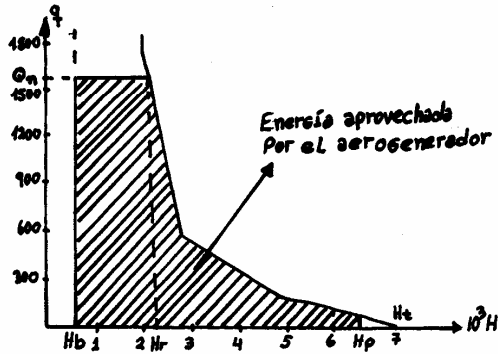


FIG. 6. Diagrama de Duración de Potencias.

Vaciando estos datos en la curva de Duración de potencia, Fig. 6, es posible obtener un q promedio, Q_p , a partir de (4) resultando ser $Q_p = 641.3$ M³/S³. Utilizando a su vez (5) se deduce que en este caso se dispone de 260.15 W/M².

$$Q_p = Q_n \frac{(H_r - H_b)}{H_t} + \frac{1}{H_t} \int_{H_r}^{H_p} f(H) dH \quad (4)$$

$$P_p = 0.9 \rho C_p Q_p \quad (W/M^2) \quad (5)$$

De acuerdo a estos datos, y recordando que la potencia a cubrir es igual a 50 Kw, el área de barrido del aerogenerador es igual a 192.2 M² con un diámetro igual a 15.6 M para el aspa.

Al igual que en el caso solar la demanda no será siempre cubierta por la energía ofertada, es por ello que se deben incluir en este caso baterías u otro método de respaldo.

4. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En el esquema fotovoltaico es posible pensar también en un sistema heliostático para la generación de electricidad. Sin embargo estos sistemas son concebidos para soportar vientos máximos del orden de 90 a 100 Km/H, lo que en el caso de Ollague resulta ser un impedimento pues en la zona en algunas épocas del año se registran vientos de hasta 150 Km/H.

A su vez los aerogeneradores de las potencias requeridas son diseñadas para velocidades de sobrevivencia superiores a 190 Km/H, lo que hace perfectamente posible su aplicación en este caso. Además, esta velocidad de sobrevivencia tan alta hace prácticamente nulas las pérdidas por este concepto pues implican un H_b bastante chico.

La variabilidad de la radiación solar es mucho menor que la del viento lo que hace que el sistema fotovoltaico sea un tanto más confiable y que sea menos crítico el problema del respaldo. Otro factor a considerar en un análisis comparativo como este es el de una futura expansión: una expansión eólica resulta bastante más compleja y costosa especialmente por las obras de ingeniería civil involucradas. Más aún, no es necesario en el caso fotovoltaico instalar inmediatamente la planta a su plena capacidad sino que es posible partir de una configuración más pequeña, realizando las expansiones a medida que estas se vayan requiriendo. En todo caso, para un correcto dimensionamiento de las plantas generadoras es posible plantear que no existen diferencias substanciales en cuanto a los méritos técnicos de ambas soluciones, siendo ambas aplicables en este caso. Quizás, lo que hace inclinar la balanza en favor de la alternativa eólica es el aspecto económico; en la actualidad se manejan cifras del orden de US\$ 1000 por Kw eólico instalado, siendo el costo del Kw fotovoltaico bastante mayor.

La energía almacenada en baterías debe ser es timada para proveer suministro eléctrico durante un periodo determinado, 24 horas o más, en tiempos de baja radiación o de bajas o nulas velocidades del viento. En todo caso para paliar un tanto el costo en baterías se puede pensar en un respaldo Diesel el que en traría a reemplazar total o parcialmente el banco de baterías.

BIBLIOGRAFIA

1. "Proyecto de electrificación pueblos del interior II Región" CORFO-INTENDENCIA II Región, 1982.
2. "Estudio de factibilidad para energizar el pueblo de Ollague", G. IRAOLA, S. ITURRA, Memoria de Titulación, Universidad del Norte, 1983.
3. "Estudio de factibilidad de centrales solares de potencia en el Norte de Chile", BATTELLE, CORFO-CHILE, 1976.
4. "Control de la generación de electricidad a partir del viento", PAEZ R., Oscar, Ciclo de conferencias Comité Interuniversitario de Energía Eólica, 1984".
5. "Wind Energy Research System Evaluation". Agricultural Research Service Conservation and Production Research Laboratory, U.S.A.

MARCOS CRUTCHIK NORAMBUENA, nació en Concepción, Chile, el 11 de noviembre de 1951. Obtuvo el título de Ingeniero 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 se desempeña 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.

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 SEGUIMIENTO 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.

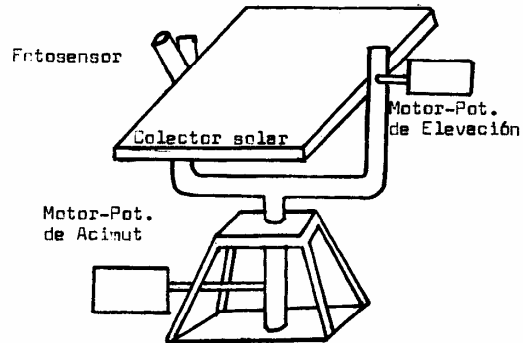


FIG.1. Estructura del prototipo.

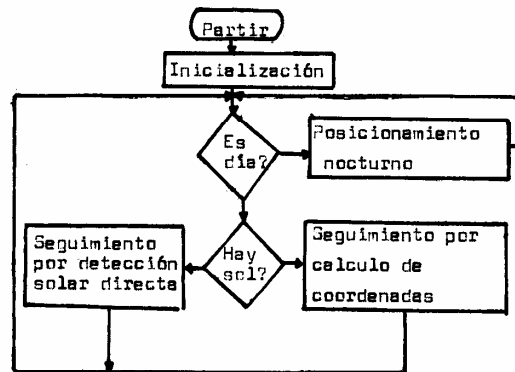
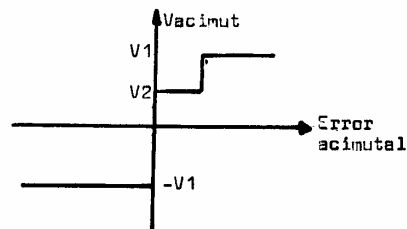


FIG.2. Diagrama de la rutina principal.

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.



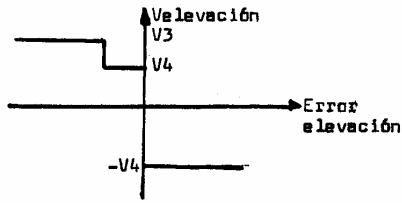


FIG. 3. Características de control para el seguimiento directo.

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.

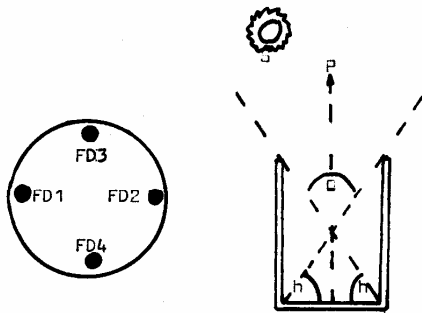


FIG. 4. Esquema del detector solar y distribución de los fotodiodos.

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 medidor se produce un cambio de signo en el error acimutal, hecho que debe ser tomado en cuenta.

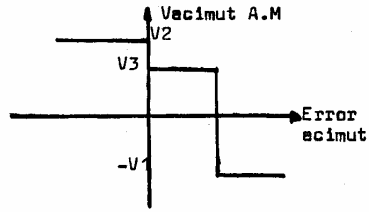
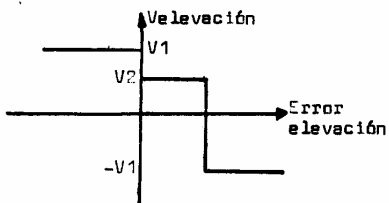


FIG. 5. Característica de control para el seguimiento por cálculo de coordenadas.

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

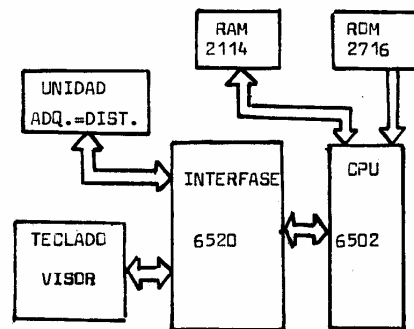


FIG. 6. Esquema del computador dedicado.

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 dirigiendo 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.

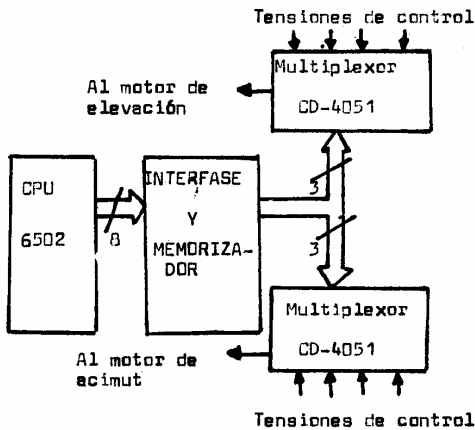


FIG.7. Diagrama de sistema de distribución.

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:

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

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

- Programa de cálculo de las coordenadas solares.
- Programa de control de heliostato.
- 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.

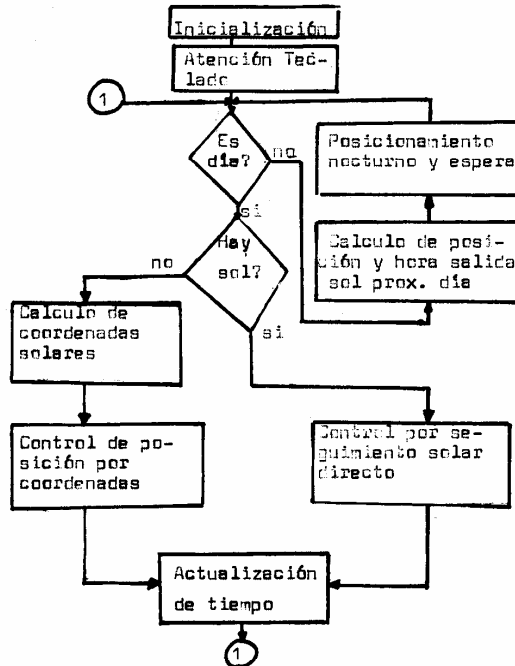


FIG.8. Diagrama de programa monitor.

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. SUBROUTINAS MATEMATICAS

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

- Rutina de normalización.
- Rutina de multiplicación.
- Rutina de división.
- Rutina de suma y resta.
- 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

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