

# DISEÑO DE UN SISTEMA PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO DE UNA PLANTA FOTOVOLTAICA

MARIO EDUARDO GUERRERO CORTES

Area de Energía Solar del Instituto de Mecánica Aplicada  
Facultad de Ingeniería - U.N.S.J.  
Avda. Libertador Gral. San Martín 1109 Oeste  
5400 SAN JUAN - ARGENTINA

## RESUMEN

En la actualidad, los paneles fotovoltaicos tienen alto costo y bajo rendimiento. Debido a que nuestro País no existe el desarrollo tecnológico apropiado para modificar dichos parámetros, se propone un sistema que partiendo de paneles comerciales permita obtener mayor energía haciendo uso de elementos corrientes y de bajo costo. En el presente trabajo se actuó sobre algunas variables que caracterizan el funcionamiento de un panel fotovoltaico, modificando: radiación incidente, temperatura y área de exposición mediante: concentración, refrigeración y seguimiento. Se construyó y ensayó un modelo a escala compuesto por una pantalla donde está montado el panel fotovoltaico, los espejos para concentración y la cámara de refrigeración; esta pantalla consta de un sistema mecánico comandado por un dispositivo electrónico que realiza el seguimiento solar y el control total de la instalación.

## 1. INTRODUCCION

El uso de la energía solar trae aparejada en algunas aplicaciones la necesidad de contar con algún dispositivo que permita seguir la trayectoria del sol.

Se diseñó un dispositivo electrónico para el seguimiento solar; un pequeño panel fotovoltaico era el encargado de suministrar la energía de carga a un conjunto de baterías de Cd-Ni y a partir de ella se alimentaba los circuitos electrónicos de control y unidades motrices. Posteriormente se estudiaron las variables sobre las cuales se podía actuar para aumentar la eficiencia del generador fotovoltaico y los resultados extrapolarlos a una instalación de conversión. El seguimiento asegura que el área normal permanezca constante y sea igual al área del panel, representando un incremento teórico superior al 50% de energía

diaria. Asociando al seguimiento un sistema de concentración, se incrementa la radiación incidente sobre el panel en un valor aproximado al factor de concentración, pero ello trae aparejado un incremento de la temperatura en el panel, desplazándose el punto de máxima potencia hacia valores menores. El problema se solucionó diseñando una cámara de agua que permitió refrigerar el panel, incrementando su potencia. A continuación se describen características de diseño, aspectos constructivos y ensayos realizados en un modelo a escala.

## 2. METODOS PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO

### 2.1. Concentración

La principal ventaja de los aparatos de concentración es que permiten incrementar la producción de potencia por unidad de área de paneles solares activos, en un factor igual al de concentración del sistema. La concentración se puede realizar a través de varios métodos, pero se eligió espejos planos por éstos de bajo costo y fácil reemplazo. Los paneles fotovoltaicos convencionales de silicio no soportan grandes factores de concentración debido a que el incremento exagerado de la corriente trae aparejada una pérdida óhmica de voltaje. Con espejos planos se logran bajos factores de concentración. Si se adopta una configuración geométrica de reflexión única, el rayo solar se refleja en un solo espejo antes de llegar al panel; esto es conveniente ya que la reflectancia del espejo es del orden del 85%. Con un sistema de reflexión múltiple, se perdería eficiencia en el sistema.

Para calcular el máximo factor de concentración, debemos considerar que el rayo incidente en el borde superior del espejo (Punto P de la Fig. 1) de-



be ser reflejado sobre el extremo opuesto del panel (Punto Q de la Fig. 1) al cual está asociado dicho espejo.

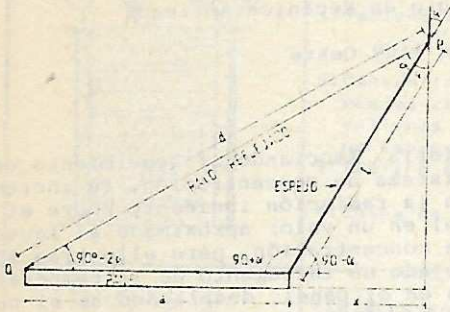


Figura 1

- a = ancho panel
- l = longitud espejo
- d = longitud rayo reflejado
- x = proyección espejo

La ley de los senos establece:

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{l}{\sin(90 - 2\alpha)} = \frac{d}{\sin(90 + \alpha)} = \frac{d}{\cos 2\alpha} = \frac{d}{\cos \alpha} \quad (1)$$

La ley de los cosenos establece:

$$d^2 = a^2 + l^2 + 2al \cos(90 + \alpha) = a^2 + l^2 - 2al \sin \alpha \quad (2)$$

Operando con (1) y (2) obtenemos:

$$1 = \frac{(\cos \alpha)^2 - (\cos 2\alpha)^2}{(\sin \alpha)^2} - 2 \cos 2\alpha$$

Resolviendo la ecuación (3), obtenemos como resultado  $\alpha = 30^\circ$  que es el ángulo necesario para que se cumpla la condición impuesta. Como consecuencia obtenemos que:

$$l = \frac{a \cos 2\alpha}{\sin \alpha} = \frac{a \cos 60^\circ}{\sin 30^\circ} = a$$

$$x = a \cos 2\alpha = a \cos 60^\circ = 0,5a$$

El factor de concentración del sistema es igual a:

$$f = \frac{a + nx}{a}$$

donde "n" es el número de espejos, colocando un espejo en cada cara del panel (en total cuatro), resulta:

$$f = \frac{a + 4 \cdot 0,5a}{a} = \frac{a + 2a}{a} = 3$$

Esto implica que el sistema tiene un factor de concentración de tres.

## 2.2. Refrigeración

El uso de un sistema de concentración trae aparejado un incremento de la temperatura en el panel, produciendo mayor corriente de cortocircuito y menor tensión de circuito abierto; el punto de máxima potencia se desplaza hacia valores menores, llegando a ser igual al del panel sin concentración. Para lograr mayor potencia se debía diseñar un sistema de refrigeración que fuera lo suficientemente efectivo como para mantener la temperatura lo más baja posible. La capacidad calorífica del agua por unidad de volumen es muy superior que la del aire; ello implica que se debe emplear un volumen mucho menor de fluido para evacuar igual cantidad de calor. Por ello se eligió la refrigeración por medio de agua.

En el panel de ensayo las celdas fotovoltaicas están montadas sobre una placa de poliestireno expandido de 1 cm. de espesor, por lo tanto la refrigeración debía ser frontal y el fluido refrigerante debía circular entre las celdas y la luz solar; para evitar hacer circular el agua por la superficie del panel (podrían producirse incrustaciones que afectarían un normal funcionamiento), se coloca sobre él una cámara de agua contenida en una bolsa plástica (P.V.C.) que es traslúcida a la luz solar; sobre ella un vidrio completa la estructura sólida del recinto. La cámara de agua tiene 1 cm. de espesor, con dos tubos plásticos en los extremos, de manera que por uno de ellos (el inferior) ingresa el agua fresca de refrigeración, ejerciendo una presión sobre todas las caras del recinto asegurando así el contacto del fluido con la superficie caliente; y por el extremo superior es evacuada el agua que ha absorbido el calor generado en las celdas (Fig. 2).



### 3. DISPOSITIVO MECANICO

A fin de evaluar prácticamente lo expuesto, se construyó un modelo a escala, compuesto por una pantalla donde está montado el panel fotovoltaico, los espejos y la cámara de refrigeración. La pantalla consta de los grados de libertad suficiente para seguir la trayectoria del sol. Por simplicidad se supone la Tierra fija y el Sol en movimiento. Los movimientos básicos son dos: uno de rotación en el plano horizontal para contrarrestar las variaciones azimutales y el otro también de rotación pero sobre un plano normal al horizontal para proporcionar las variaciones angulares de altura. Como ambos movimientos son de rotación, se trató que las partes móviles giren sobre su eje de rotación, de tal forma que se reduzca al mínimo la cupla resistente; también fue necesario considerar que los puntos de apoyo tuvieran la menor superficie de contacto y que ésta se encuentre bien lubricada para disminuir la fuerza de rozamiento. Con estas consideraciones se logra menor consumo de energía en el elemento motriz y se evita el desgaste de los elementos móviles constitutivos del sistema mecánico, asegurando así mayor confiabilidad y duración. Las unidades motrices están formadas por un par de conjuntos: motor de corriente continua de muy baja potencia (1/4 W) y caja reductora, con una relación de transmisión 10.500/1. El sistema reductor tiene dos ejes paralelos donde uno es motor y el otro motriz. Sobre el eje motor va fijado un engranaje piñón y éste engrana con uno mayor que gira libre sobre el otro eje; el mayor tiene unido un piñón que engrana a su vez con otro mayor que también va libre sobre el eje motor. Así sucesivamente se va produciendo la reducción de velocidad hasta que el último piñón libre del eje motor engrana con un engranaje mayor que está fijo al eje motriz, transmitiendo éste el movimiento. No se usó un sistema reductor tipo sinfín, a pesar de ser el más apropiado, por tener problemas de montaje a la escala que se estaba trabajando.

### 4. DISPOSITIVO ELECTRONICO

Los motores eléctricos que accionan el sistema mecánico son comandados por un dispositivo electrónico que realiza el control total de la instalación. En la Fig. 4 se muestra un diagrama en bloque del sistema.

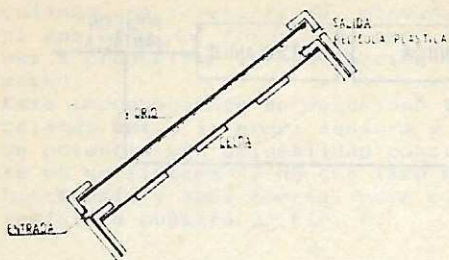


Figura 2

### 2.3. Seguimiento

En general la concentración trae aparejada la necesidad de un sistema de seguimiento pero que, a la vez, éste proporciona un mayor rendimiento de la instalación. Cuando el panel está montado en forma rígida, el área normal expuesta a los rayos solares sigue una ley cosenoidal (Fig. 3, curva a). Si se dispone de un sistema de seguimiento del sol, el área normal permanece constante y es igual al área del panel (Fig. 3, curva b). La energía obtenida a lo largo de un día es el área encerrada bajo las curvas; comparando las energías obtenidas por ambos sistemas tendremos una relación de  $(2) = 1,57$ ; esto implica que, teóricamente, un panel con seguimiento convertirá en energía útil un 50% más que uno fijo. Pero en la práctica (Fig. 3, curva c) no se logra esto, debido a que la intensidad de la luz se reduce mucho al amanecer y al anochecer ya que en tales ocasiones la luz solar debe atravesar un espesor de atmósfera mucho mayor con el agravante que, en ciertas épocas del año la presencia de nieblas o altas humedades ambientes la atenúan aún más.

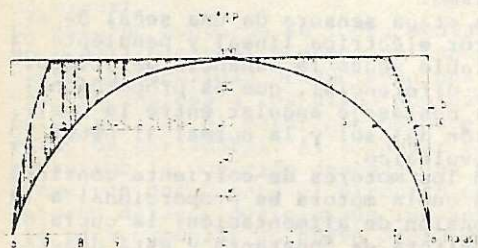


Figura 3



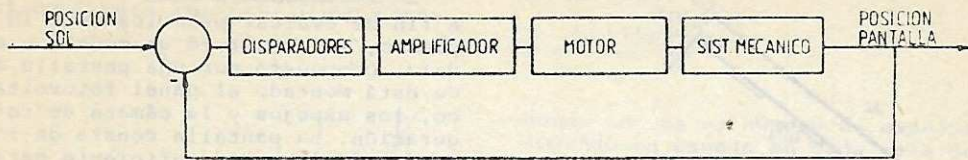


Figura 4

Los sensores (fototransistores) entregan una señal de error que es proporcional a la diferencia de posición entre el sol y el sistema; esta señal ingresa a un bloque que actúa como detector de cambio de estado. Superada la alinealidad, la señal es amplificada en el bloque amplificador.

La señal eléctrica es transformada en mecánica por el motor, y produce una realimentación, corrigiendo la posición del sistema.

El panel fotovoltaico es el encargado de suministrar la energía de alimentación al sistema; la potencia máxima del mismo se encuentra para tensiones que varían entre los 13 y 14 volts por lo tanto se adoptó 12 volts como tensión de alimentación del sistema eléctrico. Esta fuente de tensión carga un conjunto de baterías de Cd-Ni (tensión nominal de 1,2 volts y capacidad de carga de 500 mAh) y a partir de ellos se genera una fuente partida de  $\pm 6$  volts que permite alimentar los amplificadores operacionales y que los motores de corriente continua ( $V_{nominal} = 6$  V) giren en ambas direcciones.

Entre generador y acumulador se intercaló un regulador de tensión del tipo "shunt", adoptando como tensión máxima de carga de acumulador 12,6 volts. De acuerdo a la experiencia obtenida en ensayos, se llegó a la conclusión que sería necesario sólo cuatro sensores para ubicar la posición del disco solar. Estos cuatro sensores se distribuyen en forma ortogonal en posiciones equidistantes al centro, correspondiendo los alineados en el eje horizontal al movimiento azimutal y los verticales al de altura. Se eligieron fototransistores BPY62 como elementos sensores por presentar una curva de sensibilidad con mayor selectividad, y con una característica casi lineal entre los  $5^\circ$  y  $15^\circ$ .

Colocando dos fototransistores desfasados  $10^\circ$  a ambos lados de la normal se tiene una respuesta de sensibilidad como lo muestra la Fig. 5.

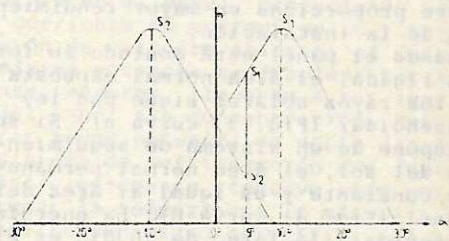


Figura 5

Efectuando la diferencia de señales que proporcionan ambos sensores, se tiene la señal de error:

$$e = S_1 - S_2$$

Cuando el sol está sobre la normal, la señal de error es cero, pero si se desplaza (por ejemplo  $5^\circ$  a la derecha) se aprecia que  $S_1$  aumenta y  $S_2$  disminuye, proporcionando una señal de error (con signo) que indica en qué dirección se ha producido el mismo.

La etapa sensora da una señal de error eléctrica lineal y pendiente variable según la ganancia del circuito diferencial, que es proporcional al desfase angular entre la posición del sol y la normal al panel fotovoltaico.

En los motores de corriente continua la cupla motora es proporcional a la tensión de alimentación; la cupla opositora es constante y está determinada por el sistema mecánico. Si la señal de error es amplificada por



una etapa de potencia, la cupla motora crece linealmente desde cero, circulando una corriente muy elevada por el bobinado del rotor, pudiendo llegar a producirse la destrucción del mismo.

Este inconveniente se solucionó intercalando entre la etapa sensora y la de potencia una alinealidad consistente en un sistema SI-NO con lazo de histéresis y zona muerta, cuya característica muestra la Fig. 6.

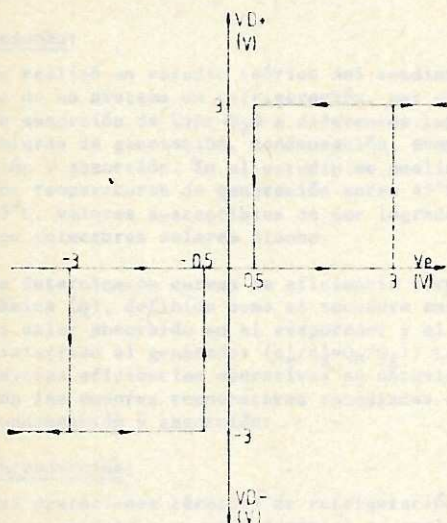


Figura 6

Una respuesta de este tipo se obtuvo con una combinación de dos disparadores Schmitt, los cuales están contruidos con transistores complementarios en serie.

La señal de error originada en la etapa sensora, al pasar por los disparadores se divide en dos totalmente definidas: una positiva ( $V_{D+}$ ) y otra negativa ( $V_{D-}$ ), las cuales son amplificadas por dos caminos distintos para permitir que el motor gire en ambos sentidos (según polaridad de la señal de error).

El retorno nocturno se logra mediante un sencillo circuito donde un LRD detecta la oscuridad produciendo una señal que ingresa a los disparadores y éstos activan el motor que produce la rotación horizontal. Al alcanzar el mecanismo la posición deseada, un microswitch desconecta el circuito de retorno dejando posicionada la pantalla para comenzar un nuevo ciclo de generación.

## 5. ENSAYO DE LA INSTALACION

Este se realizó relevando las curvas características V-I del panel fotovoltaico, primeramente incorporado el sistema y luego colocado en una base fija. La toma de datos se realiza cada una hora.

A partir de las curvas características obtenidas se determinaron los puntos de máxima potencia, los cuales están representados en la Fig. 7.

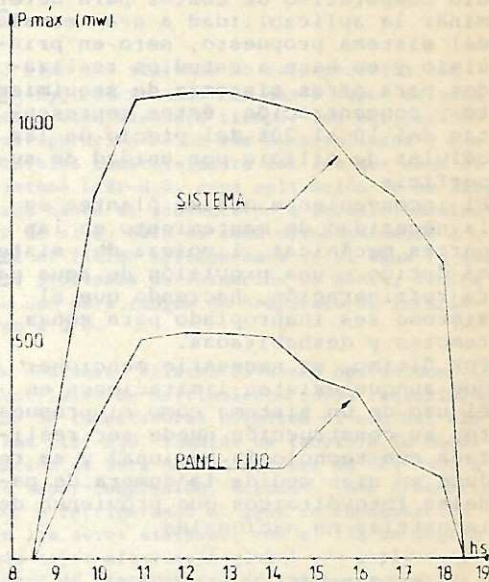


Figura 7

Realizando la integración de las áreas encerradas bajo las curvas de máxima potencia instantánea, se obtiene:

Energía diaria del sistema = 9.151 mWh

Potencia instantánea promedio = 915 mW

Energía diaria del panel fijo = 3.721 mWh

Potencia instantánea promedio = 372 mW

El rendimiento del sistema propuesto comparado con el del panel fijo es:

$$= \frac{\text{Potencia prom. sistema}}{\text{Potencia prom. panel fijo}}$$

$$= \frac{915 \text{ mW}}{372 \text{ mW}} \cdot 100 = 246\%$$



## 6. CONCLUSIONES

A simple vista se puede apreciar que se logra con una instalación de este tipo un 146% más de energía diaria que la que entrega un panel montado en forma fija. Ello implica que se puede reducir en más del 50% el número de paneles en una central de generación fotovoltaica de determinada potencia.

Se debe realizar un detallado estudio comparativo de costos para determinar la aplicabilidad a gran escala del sistema propuesto, pero en principio y en base a estudios realizados para otros sistemas de seguimiento y concentración, éstos representan del 10 al 20% del precio de las células de silicio por unidad de superficie.

El inconveniente que se plantea es la necesidad de mantenimiento en las partes mecánicas, limpieza del sistema óptico y una provisión de agua para refrigeración, haciendo que el sistema sea inapropiado para zonas remotas y deshabitadas.

Por último, es necesario mencionar que aunque existen limitaciones en el uso de un sistema como el propuesto, su construcción puede ser realizada con tecnología nacional y se reduce en gran medida la compra de paneles fotovoltaicos que provienen de industrias no nacionales.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Juster, F.: "Las células solares" Paraninfo (1980)
- Kuchen, B.R.: "A Portable Low Power Alarm Device for Abnormal Heart Activity Detection" Philips International Institute. Report N°275
- Moragues, J.A. y Scheuer, W.: "Conversión de Energía Solar en Electricidad. Estudio de Evaluación" Informe CNEA-NT 23/77 de la Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina.
- Moreno, M.A.: "Aprovechamiento de la Energía Solar" IIIa. Reunión Regional de Telecomunicaciones (1981)
- Palz, W.: "Electricidad Solar, Estudio Económico de la Energía Solar" UNESCO (1980)