

## DISEÑO Y CONSTRUCCION DE SEGUIDORES SOLARES. ANALISIS Y COMPARACIÓN<sup>1</sup>

**Daniel Hoyos, Marcelo Gea, Carlos Cadena<sup>2</sup> y Ricardo Echazú<sup>3</sup>**

INENCO – Instituto UNSa. – CONICET  
Universidad Nacional de Salta  
Av. Bolivia 5150 – A4408FVY Salta, República Argentina  
FAX 54 387 4255489 – e-mail: hoyosd@unsa.edu.ar

### RESUMEN

El presente artículo tiene por objeto presentar diferentes estrategias y algunos dispositivos electrónicos, utilizados en la realización del seguimiento de la trayectoria del sol, para su aplicación en concentradores solares, indispensables en los sistemas solares térmicos, que requieren temperaturas elevadas. Se analizan sistemas a lazo cerrado, que emplean motores de corriente continua para el posicionamiento y otros, también a lazo cerrado, que emplean motores paso a paso. El objetivo del análisis está dirigido a poder realizar la comprobación y el ensayo de sus características y los resultados obtenidos permitirán adecuar los mismos, frente a cada situación en particular, para mejorar el rendimiento de cada sistema. Como un caso de estudio, se presenta un campo de espejos de tipo “Concentrador Fresnel”, que se ubicará en la localidad de San Carlos, Provincia de Salta, cerca de los 26° LS y 66° LO, que generará vapor, para una central termoeléctrica.

**Palabras clave:** seguidor solar, foto-sensor, concentrador, posicionamiento

### INTRODUCCION

La conversión de energía solar es uno de los tópicos más importantes de investigación en energías renovables. Existen diversas formas de realizar esta transformación, una de ellas consiste en convertir la energía solar en energía térmica, utilizando concentradores solares, los mismos necesitan seguir la trayectoria del sol. Existen diversos tipos de sistemas que cumplen este objetivo, los sistemas pasivos (Clifford, 2004) y los activos: que utilizan motores para orientarse. (Hession & Bonwick, 1984).

Básicamente los sistemas activos son dispositivos mecatrónicos que integran sistemas mecánicos y electrónicos. En lo que respecta al control se puede clasificar en sistemas de bucle abierto con fotosensores, estos sistemas son sensibles a los cambios climáticos y sistemas de bucle cerrado utilizando algoritmos matemáticos que ubiquen al concentrador según la hora, latitud del lugar. Finalmente por el tipo de desplazamiento que deben realizar existen dos tipos básicos de concentradores: Sistemas de un eje, el concentrador debe seguir al sol desde el amanecer (este) hasta el atardecer (oeste) (Cope et. al. 1981) y sistemas de dos ejes que combinan dos movimientos. (Al-Naima & Yaghobian N. A., 1990, 1991)

Los autores han estudiado dispositivos de seguimiento y sincrónicos para equipos solares, principalmente cocinas y fotovoltaicos, presentando algunos resultados en ASADES de años anteriores. (Echazú et. al., 1998); (Cadena et. al., 2002); (Hoyos et. al., 2005). En el ámbito de ASADES, otros investigadores han estudiado sistemas de seguimiento para estas y otras aplicaciones (De Lucia et. al. 1999).

Al presente se plantea el diseño y ensayo de sistemas para el movimiento de los espejos de concentradores lineales Fresnel (CLF) de mayores dimensiones, (Häberle et. al. 2001); (Mills, 2004) siendo mayores las exigencias en lo que respecta a la precisión del mecanismo y a la vida útil de los equipos.

En el INENCO, se ha estudiado un prototipo de CLF de 8 m<sup>2</sup> (Gea et.al., 2006) y al presente se encuentran en etapa de diseño, sistemas de mayores dimensiones para la producción de vapor sobrecalentado, los que se aplicarán a la generación de energía eléctrica.

En estos sistemas, la distancia focal es de 4 metros o más, por lo cual la precisión en el mecanismo de seguimiento debe ser considerablemente mayor que para otras aplicaciones. Mientras que para un PV es aceptable un ángulo de desviación de 5° para sistemas sin concentración y para cocinas solares, de hasta 20°, en un CLF de 4 metros de altura se requieren desviaciones menores a 0,5°, valor que disminuye a medida que aumenta la distancia focal. (Welford & Winston. 1989).

Además del movimiento de los espejos, para que la radiación solar reflejada incida en el absorbedor, el mecanismo debe volver a la posición inicial al final del día. También es necesario un subsistema que coloque todos los espejos hacia abajo ante una eventualidad como el granizo. Esta acción debe ser una respuesta rápida a la situación de pánico detectada por sensores específicos incorporados a

<sup>1</sup> Parcialmente financiado por CIUNSA

<sup>2</sup> CONICET

<sup>3</sup> CIUNSA

la lógica de control del sistema.

Puesto que para la generación de energía eléctrica, los CLF deben funcionar en forma segura y precisa durante largos períodos y que un sistema sincrónico es sensible a los desajustes del reloj que lo controla, se plantea el uso de sensores de posición que controlen la correcta orientación de los espejos, combinados con un sistema de seguimiento sincrónico.

En el presente trabajo se discuten experiencias realizadas en el INENCO con estos subsistemas.

### LOS CONCENTRADORES LINEALES FRESNEL

En los concentradores lineales Fresnel, cuyo esquema se representa en la figura, los reflectores son cilindro parabólicos pero de baja curvatura. Se instalan a nivel del piso y siguen la trayectoria aparente del sol girando alrededor de ejes horizontales. Los reflectores concentran la radiación solar directa en un absorbedor que se encuentra fijo a algunos metros de altura. Este consiste en una torre lineal con la cavidad en su cara inferior como se muestra en la figura 1. El espejo más alejado se debe encontrar a una distancia igual a la altura del absorbedor

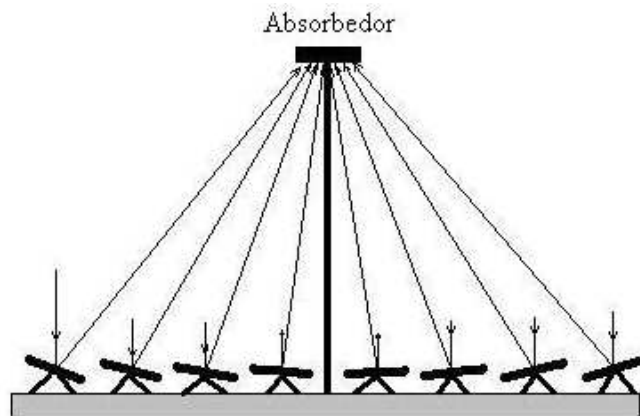


Figura 1: Concentrador lineal tipo fresnel

Como el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre el espejo debe ser igual al ángulo de reflexión, el espejo debe moverse a la mitad de la velocidad aparente del sol. Lo que define al sistema de seguimiento del sol como de un eje, por las dimensiones de los concentradores deben ser sistemas activos. El sistema debe seguir al sol durante aproximadamente ocho horas y debe dar una vuelta cada 48 horas. Después del atardecer debe regresar a su posición inicial que corresponde a un ángulo de  $67.5^\circ$  para el espejo más alejado, y a partir del amanecer cuya hora cambia día a día debe reiniciar su trayectoria.

Las características que debe tener un posicionador solar para este sistema son las siguientes:

1. Velocidad de rotación 1 vuelta 48 horas.
2. Posibilidad de ser orientado manualmente
3. Regresar a la posición inicial en la noche

### SISTEMAS A LAZO CERRADO

Este sistema consiste en sensores que detectan la posición del sol, un motor en este caso de corriente continua y un circuito de control que permite seguir el movimiento del sol como se muestra en la figura 2. El control se realiza variando la tensión.

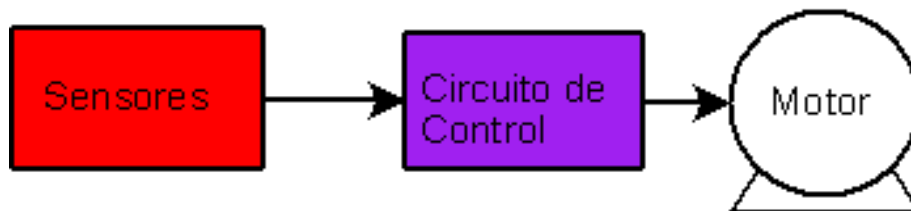


Figura 2: Esquema general de un sistema a lazo cerrado.

El primer tipo de sensores que se ensayó es el mostrado en la figura 3 consiste en un cilindro de aproximadamente 30 cm que tiene en su interior dos fotosensores (fotorresistencias) orientados de forma que uno se encuentre hacia el este y el otro hacia el oeste, ambos sensores están conectados entre sí, en configuración puente como se muestra en la figura 4. Cuando la tierra se mueve uno de los sensores entra en sombra y por lo tanto la resistencia varía lo que desequilibra el puente y acciona el motor de CC, hasta compensar la diferencia, si entra en sombra el segundo sensor el motor funciona en el otro sentido.

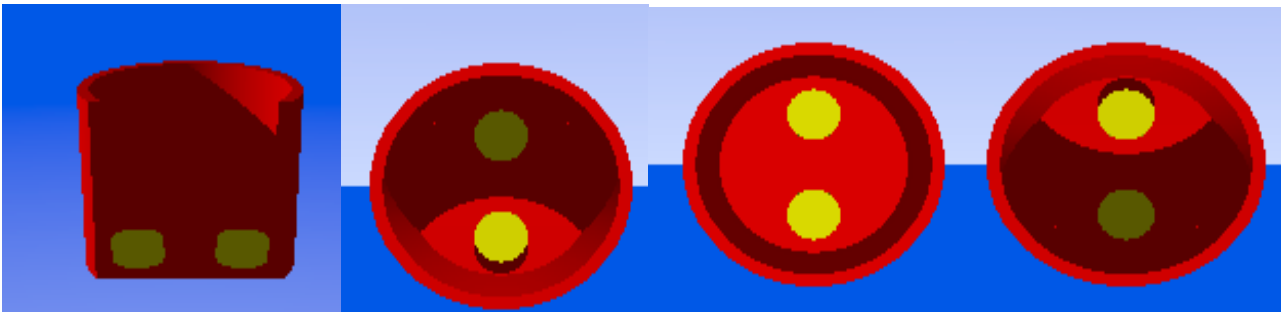


Figura 3: Esquema del sensor

Este circuito tiene algunas limitaciones, las que tienen que ver con su comportamiento en días nublados, en los cuales la iluminación disminuye sobre ambos sensores, el sistema pierde el control y no lo recupera hasta que es orientado manualmente. Las fotorresistencias tienen una inercia muy grande y por lo tanto tardan un tiempo en reaccionar. Además no cumple con las condiciones dos y tres de la sección anterior.

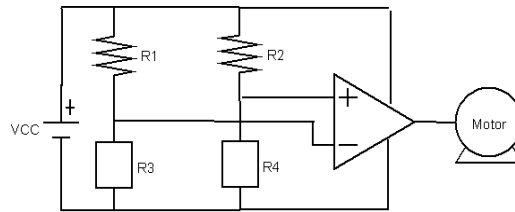


Figura 4: Circuito de Control

Para optimizar este sistema se realizaron cambios en el tipo de sensor utilizado y en el circuito de control, y se propone en consecuencia un sistema que tenga una velocidad mínima un poco menor que la mitad de la velocidad de rotación de la tierra y que cuando el sistema se desenfoca se acelera para recuperar la posición inicial. El sensor en este caso debe detectar si el sistema está enfocado, y además si el cielo está nublado o no, por esta razón utiliza un sensor colocado dentro de un cilindro con el objeto que indique si el sistema está enfocado o no y también se conecta otro que apunta hacia el cielo y detecta si está nublado. Ambos sensores se conectan en oposición de forma que sus señales se resten, definiendo varias condiciones posibles como se muestra en la tabla:

Nublado	Señal Sensor	Tensión	Motor
No	Iluminado	negativa	Lento
No	Sombra	positiva	Rápido
Si	baja	cercana a cero	Lento

Tabla 1: Definición de condiciones para caracterizar la velocidad del motor.

La tabla se interpreta de la siguiente forma: si **No** está nublado y el sensor está **Iluminado**, el sistema se tiene que desplazar a una velocidad cercana al movimiento de la tierra pero más lenta, en cambio si el sensor no está **iluminado** y **No** está nublado, se debe aumentar la velocidad hasta que se ilumine. En el caso que la radiación es baja porque está nublado, o en el amanecer o el atardecer, el sistema no se detiene y sigue avanzando a una velocidad menor que la de rotación de la tierra. Este método permite que el sistema no se pierda cuando está nublado y rápidamente recupere su enfoque cuando el cielo está despejado

Los sensores utilizados son LEDs cuyo espectro de emisión se muestra en la figura 5, el uso de LEDs tiene algunas ventajas: tiempo de respuesta alta, tiene una pequeña óptica que le permite detectar la radiación directa, es un sensor de bajo costo y solamente detecta el espectro visible en este caso el color verde. En la figura 5 se observa una vista de frente, un corte del sensor y su espectro.

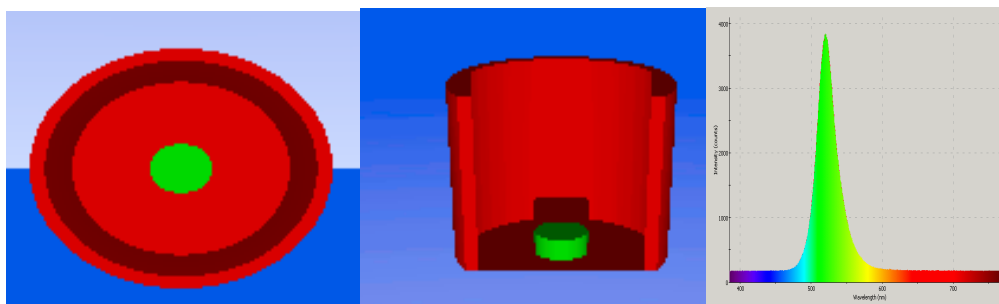


Figura 5: Sensor LED de frente, en corte y su espectro de emisión.

Dado que la velocidad del concentrador debe ser similar a la mitad de la velocidad de rotación de la tierra, se utilizó un motor de corriente continua cuya velocidad puede ser regulada por tensión, con una reducción que se muestra en la figura 6, a tensión nominal da 1.5 rpm a 12V. Para obtener la mitad de la velocidad de rotación de la tierra se construyó una reducción de 3000 con dos reductores de 50 y 60, lo que permite a tensión nominal tener una velocidad de 0.72 revoluciones por día, un poco mayor que la velocidad de 0.5 revoluciones por día que necesita el sistema. En la figura 5 se muestra una foto del motor con su reductor y el conjunto completo desarrollado.



Figura 6: Motor con reducción.

El circuito de control utilizado se muestra en la figura 7 el integrado es un LM317, su tensión de salida es:

$$V=1.25((r2//r3)/r1+1)$$

Cuando el cielo está nublado y el sistema está enfocado LED1 - LED2 da una tensión menor a cero, por lo tanto el comparador está en uno y ambas resistencias están conectadas, la tensión de salida es menor a la tensión utilizada, aproximadamente 6V y tiene una velocidad de 0.4 revoluciones por día. Cuando el cielo está despejado y el sistema está enfocado “LED1-LED2” da una tensión cercana a cero y no cambia el estado. En caso que el cielo esté despejado y el sistema no esté enfocado, LED1-LED2 es mayor que cero y el sistema cambia de velocidad hasta enfocar nuevamente.

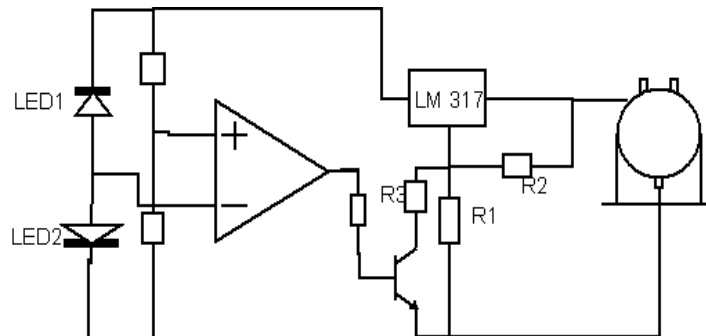


Figura 7: Circuito de control para el detector solar de LED.

El sistema propuesto consume 12 W y soluciona algunos de los problemas que tenía el sistema anterior. En caso de cielo nublado sigue el movimiento a una velocidad menor, y cuando se despeja el cielo recupera lo que se atrasó. Por lo tanto este sistema no se “pierde”, pero no cumple con los puntos 2 y 3 de la introducción.

### SISTEMA DE MOVIMIENTO DE ESPEJOS CON MOTOR PASO A PASO

Los espejos deben girar durante las horas de sol, a una velocidad de una vuelta cada 48 horas para que la radiación reflejada incida sobre el concentrador secundario. Esto puede lograrse mediante un movimiento continuo o de pequeños pasos, en el esquema de la figura 8 se presenta el esquema completo del posicionador el cual utiliza una computadora personal PC que se comunica a través del puerto paralelo con un circuito de control, a un motor paso a paso de una impresora tipo “matricial Epson”, la reducción utiliza un disco de bandeja de tocadiscos y un conjunto de corona y piñón de un viejo lavarropas de tipo basculante. De éste último se utilizaron también un tren de engranajes de bronce y la carcasa de la caja de transmisión.

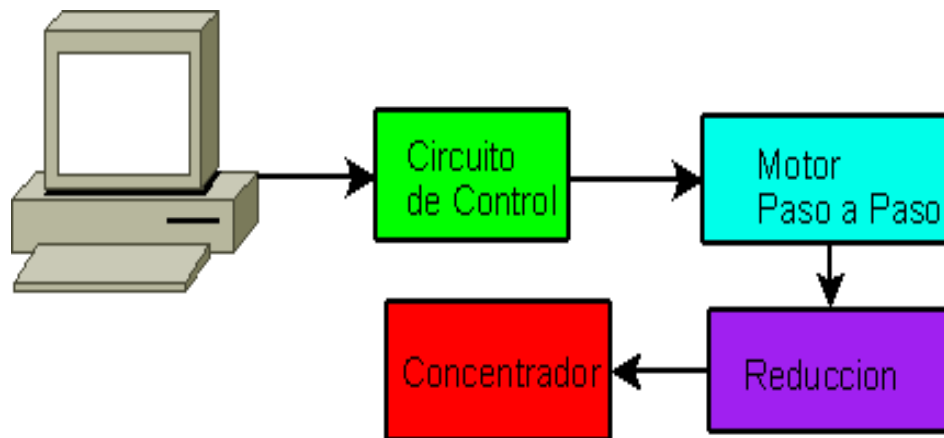


Figura 8: Esquema general posicionador.

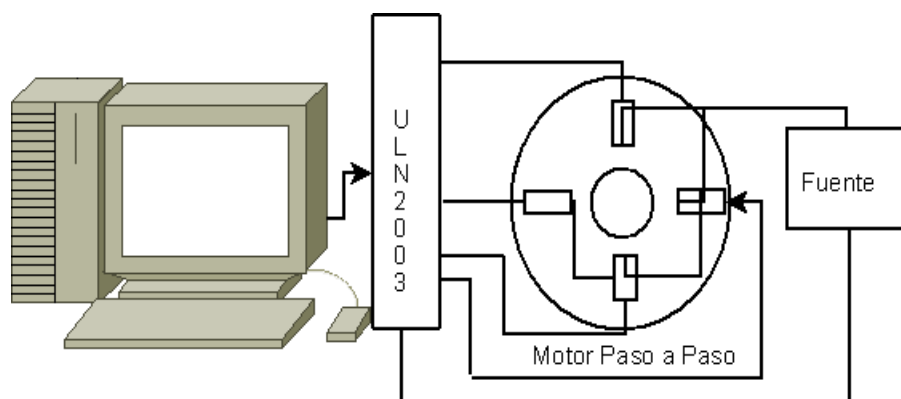


Figura 9: Esquema de control y potencia.

El programa está implementado para realizar una vuelta cada dos minutos, el error cometido es del 1%. Las computadoras personales disponen de RTC ( real, time, clock) que son circuitos integrados que suministran el dato de la hora, fecha de forma autónoma. Estos dispositivos tienen errores de 5 ppm lo que permite garantizar un correcto funcionamiento del sistema.

El circuito de control utiliza el circuito integrado ULN2003 como se muestra en la figura 9, el cual es un arreglo de 7 transistores Darlington y el mismo es utilizado como interfaz entre el puerto paralelo de la computadora y el motor paso a paso de tipo unipolar. En la figura 8 se muestra el esquema general del circuito de control y potencia del sistema.

En la figura 10 se muestra el sistema de transmisión completo. En la primera etapa, el motor paso a paso mueve un disco de 250 mm de diámetro por medio de una correa de goma. La correa dentada es de la misma impresora Epson y trabaja sobre el piñón dentado del motor. La relación de esta transmisión es aproximadamente 250/14. La segunda etapa está formada por el tren de engranajes rectos de bronce, la relación es: 30/9. La tercera, de relación 48/1 se compone por el conjunto de corona y piñón helicoidales. Sobre un lado de la corona se encuentra montada una biela con el eje de rotación a 100 mm del eje de la corona que trasmite el movimiento a la barra que vincula los ejes de rotación horizontales de los espejos. La relación de engranajes total es entonces:

$$(250 * 30 * 48) / (14 * 9) = 2857$$

El mecanismo debe realizar media revolución por día que es equivalente a  $1/(2*24*60)$  rpm, si se utiliza una reducción de 2857 la velocidad del motor debe ser de:

$$v(\text{rpm})=1/(2*24*60)*2857=0.9921 \text{ rpm}$$

Para ensayar la máquina se colocaron pesas de hasta 100 Kg colgadas de la biela y se midió la corriente y la tensión, obteniéndose  $4.6 \text{ V} \times 0.97 \text{ A} = 4.48 \text{ W}$  durante 4 segundos cada 2 minutos, lo que al cabo de 10 horas de funcionamiento representa un consumo diario de 1.2 kJ. Estos valores no variaron con el motor trabajando en vacío y con la carga máxima de prueba.

Este sistema debe comenzar a utilizarse a distinta hora todos los días dado que la hora del amanecer varía a lo largo del año. Esto implica que el programa debe calcular todos los días la hora del amanecer. Los pequeños errores del reloj se suman y en algún momento éste debe ajustarse de nuevo.

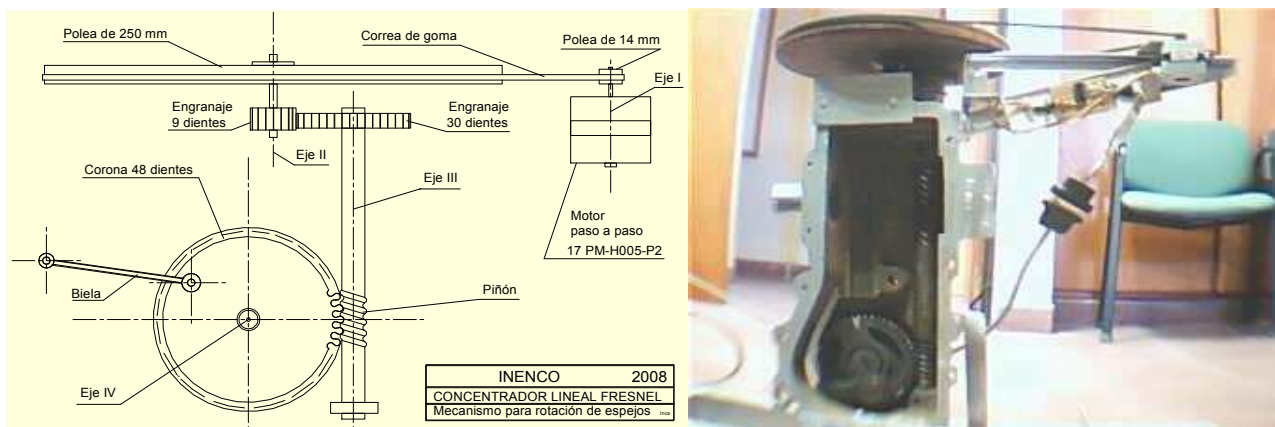


Figura 10: Mecanismo para rotación espejo con motor paso a paso.

## COMPARACIÓN

Dada la altísima precisión que se alcanza gracias a los relojes RTC de las computadoras personales, en principio un sistema basado en PC a lazo abierto permite posicionar el sistema de una forma apropiada e independiza el sistema de la presencia de nubes, el cual es el defecto más grande que tiene el sistema realimentado, pero este sistema en caso de detención momentánea, por desperfectos o para tareas de mantenimiento, se pierde totalmente y debe ser orientado a mano. El sistema realimentado tiene como ventaja que después de una detención momentánea, puede recuperar su posición automáticamente. También el sistema realimentado tiene ventajas en disponer de una señal que indica si el sistema está enfocado o no, para la verificación de un observador.

Ambos sistemas funcionan a una velocidad muy baja y por lo tanto en caso de emergencia, no pueden reaccionar rápidamente. Por ejemplo para proteger los espejos en caso de granizo u otra inclemencia del tiempo.

El sistema a lazo abierto también puede utilizarse fácilmente para desenfocar el sistema rápidamente en caso de sobrecalentamiento y luego puede ser restablecido fácilmente.

## CONCLUSIONES

Se han construido y ensayado dos sistemas de seguimiento por sincronismo para concentradores solares y se los ha comparado con sistemas de seguimiento estudiados anteriormente. Dadas las premisas particulares, planteadas en el trabajo, se piensa que para el caso que nos ocupa, deben incorporarse ambos para que funcionen en forma complementaria, por lo que queda pendiente la implementación de una lógica de control que vincule ambos tipos de dispositivos. Del desarrollo de esta lógica de control, dependerá también su cualidad como sistema con redundancia, imprescindible en dispositivos que manejan niveles de potencia elevados, cuando se requiere una buena confiabilidad en el servicio.

## REFERENCIAS

- F. M. Al-Naima y Yaghobian N. A. (1990). Design and construction of a solar tracking system. *Solar & Wind Technology* Volume 7, Issue 5, pp.611-617
- F. M. Al-Naima y Yaghobian N. A. (1991). A microprocessor-based control system for a sun tracker. *Renewable Energy* Volume 1, Issue 2, pp.183-198
- Cadena C., Bárcena H. et. al. (2002). Sistema de Seguimiento para Cocinas Solares Alimentado por Módulo Fotovoltaico. *AVERMA* Vol 6, pp. 4.37 ISSN 0329-5184
- Clifford M.J. y D. Eastwood, (2004). Design of a Novel Passive Tracker. *Solar Energy*. Vol. 77 (3), pp. 269-280.
- A. W. G. Cope y N. Tully (1981). Simple tracking strategies for solar concentrations. *Solar Energy* Volume 27, Issue 5, pp.361-365
- De Lucia A., Holm S., Aguirre J., González D., Gross H., Marengo J. (1999) Concentrador solar autodirigido con intercambiador. (Ira. Etapa : seguimiento ) *AVERMA* Vol 3, pp. 3.13 - ISSN 0329-5184
- Dobon F., A. Lugo, and J. Monedero, (2003). First Results of the Tetra-Track System and Control Electronics. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, IEEE & WCPEC-3, Osaka, pp. 2050-2053,.
- Echazú R. y Cadena C. (1998). Mecanismo de Seguimiento para Cocinas Solares. *AVERMA* Vol. 2, pp. 61 - ISSN 0329-5184
- Gea M., Saravia L. et al (2007). Concentrador Lineal Fresnel para la Generación Directa de Vapor de Agua. *AVERMA* Vol 11, pp. 3.83 - ISSN 0329-5184
- Hession P.J y Bonwick W.J. (1984). Experience with a sun tracker system. *Solar Energy* 32, 1, 3-11
- Hoyos D., Bárcena H., Echazú R., Cadena C. y Farfán R. (2005). Control Inteligente de Seguidor Solar Utilizando la Técnica de Lógica Difusa o Borrosa. *AVERMA* Vol 9, pp. 8.97 - ISSN 0329-5184
- Häberle A., Zahler C., de Lalaing J., Ven J., Sureda J., Graf W., Lerchenmüller H., Wittwer V. (2001). The Solarmundo Project. Advanced Technology for Solar Thermal Power Generation. *Solar World Congress, International Solar Energy Society Conference, Adelaide, Australia.*
- K. Karimov, M. Saqib, and P. Akhter, (2005). A Simple Photovoltaic Tracking System. *Solar Energy: Materials and Solar Cells*, Vol.

87 (1-4), pp. 49-59

Mills D., Morrison G., (2000). Compact Linear Fresnel Reflector Solar Thermal Power Plants. Solar Energy Vol. 68, No.3, pp. 263 – 283.

Mills D. (2004). Advances in Solar Thermal Electricity Technology. Solar Energy Vol. 76, pp. 19-31.

Welford W. T. & Winston R. (1989). High Collection Nonimaging Optics. Academic Press Inc., USA, ISBN 0-12-742885-2

## **ABSTRACT**

This paper deals about some strategies and electronic devices used to move solar concentrators following the sun. Solar trakers are essentials in termic- conversion at high temperature. Close noose systems, with DC motors and steper motors are analyzed. A Compact Linear Fresnel Reflector made to generate over heat steam are showed as case study. These solar power station shall be build at San Carlos, Salta about 26° S, 66° W.

**Keywords:** solar tracking, LDR, photosensor.