

SISTEMAS INFORMATICOS PARA EL DISEÑO, CONTROL Y ALERTA EN UN SISTEMA CONCENTRADOR TIPO FRESNEL¹.

Germán A. Salazar², Carlos A. Cadena³
Departamento de Física - Facultad de Ciencias Exactas
INENCO-Universidad Nacional de Salta
Avda Bolivia 5150 – A4408 FVY – Salta Capital (Salta) – Argentina

RESUMEN:

En este artículo se muestran los avances obtenidos en el desarrollo de sistemas para el diseño y control del equipo concentrador tipo Fresnel construido en el campo de pruebas del INENCO-Salta. También un sistema de prevención de fenómenos meteorológicos (granizo). *Simunel* es un software que permite determinar las velocidades de rotación de espejos y simular el movimiento de los mismos según la posición geográfica y el día del año. El sistema de alerta temprana de granizo (*SATG*) es otro sistema que está en desarrollo, y que permitirá determinar la posibilidad de ocurrencia de granizo. Se podrán entonces tomar recaudos a tiempo y evitar la destrucción de las superficies espejadas del concentrador. En este trabajo se detallan las características que deben reunir estos sistemas.

Palabras clave: Fresnel, sistemas solares, prevención anti granizo.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha estado desarrollando un sistema concentrador tipo Fresnel (SCTF) en la Universidad Nacional de Salta para aprovechar el gran potencial que presenta el recurso solar en el Noroeste de la Republica Argentina (NOA) (Saravia *et al* ,2008). Otros SCTF se han desarrollado e instalado en Estados Unidos y Australia, además de diferentes otras configuraciones para sistemas concentradores (principalmente concentradores parabólicos, Power Tower y concentradores Stirling). Particularmente China está desarrollando una planta solar para generar 1 MW utilizando la configuración Power Tower (Yao *et al*, 2009)

Si bien los SCTF suponen diseños más sencillos que otras configuraciones de sistemas concentradores (el movimiento de los espejos planos tiene un solo grado de libertad), existen muchos aspectos técnicos que deben tenerse en cuenta en el diseño de la ingeniería de los SCTF. Los principales ítems de funcionamiento a considerar son

- i) movimiento de los espejos
- ii) ubicación del absorbedor
- iii) sistema de acumulación
- iv) recirculación de agua



Figura 1a: eje de rotación y malla

1b. Caja de reducción

1c. Motores de impulsión

Existen otros ítems que deben estudiarse para cuando el sistema se encuentre funcionando nominalmente, y que si bien no hacen al funcionamiento en sí mismo del sistema, afectan su producción y vida útil. Uno de ellos es el factor climático. Las zonas del NOA donde se considera factible la instalación de SCTF presentan condiciones en las que tormentas de granizo pueden ocurrir en el verano, por lo que desarrollar un protocolo de seguridad ante esta eventualidad resulta de importancia vital dado el alto grado de destrucción que el granizo produce en los espejos del concentrador. En la figura 1a se observa el

¹ Parcialmente financiado por CIUNSA

² Docente Facultad de Ciencias Exactas – U.N.Sa.

³ CONICET – U.N.Sa.

espejo invertido (girado 180°) con la malla anti-granizo, tal como se lo dispondría en el caso de una tormenta de este tipo pronosticada con alguna antelación. También se observa en la 1b una caja de reducción y en la 1c los correspondientes *motores paso a paso*, que originan el movimiento de rotación sobre el eje central. Conviene resaltar el hecho que, en su funcionamiento normal, este movimiento es muy lento, por lo que en caso de anunciarse una tormenta como las descritas el motor deberá funcionar en otro rango de velocidad hasta alcanzar la posición de la figura 1a.

SISTEMA DE AYUDA DE DISEÑO Y CONTROL: SIMUNEL V1.0

Como parte del desarrollo del SCTF que se está probando en el campus del INENCO-Salta se deben ensayar y poner a punto subsistemas tales como, el sistema seguidor de espejos (Cadena y Echazú, 2009). Determinar la velocidad angular con la que se desplazarán los espejos es una tarea de especial importancia ya que si los espejos no pueden direccionar la radiación solar hacia el absorbedor, el rendimiento del sistema se reducirá drásticamente.

Para ayudar al equipo encargado del desarrollo de sistema de movimiento de los espejos se desarrolló el software *Simunel* (SIMULador del sistema fresNEL). El mismo se escribió en Visual Basic 6, principalmente por la facilidad de programación del entorno gráfico de ese lenguaje.

La pantalla de Simunel v1.0 se divide en 4 sectores (Figura 2):

Sector 1: **Ingreso de datos y consideraciones de la geometría del SCTF**: en esta sección se ingresa latitud, longitud, día y mes del año así como zona GMT. Estos datos permiten determinar cómo se moverá el Sol en el cielo del sitio (punto por donde sale, punto por donde se pone y camino a recorrer en la esfera celeste). Las consideraciones geométricas del SCTF son cantidad de espejos (no mayor a 5) a cada lado de la torre del absorbedor, altura de la torre donde se encuentra el absorbedor y distancia entre espejos. La configuración del SCTF que se construyó en el campus del INENCO es la de dos campos de espejos a ambos lados de la torre del absorbedor.

Sector 2: **Resultados de los cálculos**: el programa calcula primero la hora y posición de salida del Sol, luego determina el ángulo que debe tener cada espejo para que el rayo reflejado incida en el absorbedor. Este cálculo se realiza con una frecuencia de 4 minutos, por ser el tiempo que tarda el Sol en recorrer 1° de arco en su trayectoria por el cielo, hasta el momento en que se oculta. La información del valor del ángulo que logra la incidencia directa de la radiación directa se muestra para cada espejo (se consideran los 10 espejos) según la hora oficial argentina. También se muestra como evoluciona la altura solar respecto del tiempo y la máxima altura solar posible de ese día. Por último se determina la velocidad angular que debe tener cada espejo en ese día en particular para lograr incidencia de radiación directa.

Sector 3: **Simulación de giro de los espejos**: es una pantalla donde se muestra la evolución de cada espejo respecto de sus vecinos considerando solo un grupo. La gráfica está diseñada para el SCTF instalado en Salta: la torre del absorbedor está al este de los espejos. En la gráfica se ha marcado la posición de cada espejo (e1-E, ..., e5-E).

Sector 4: **Simulación de la marcha de rayos**: este gráfico permite tener una noción de la posición del Sol en cada época del año, así como el efecto de corrimiento de los rayos reflejados, el que produce por tener los espejos un solo grado de libertad. Según la hora y la época del año, este corrimiento puede ser importante, si por ejemplo la longitud del absorbedor es pequeña, comparada con las demás

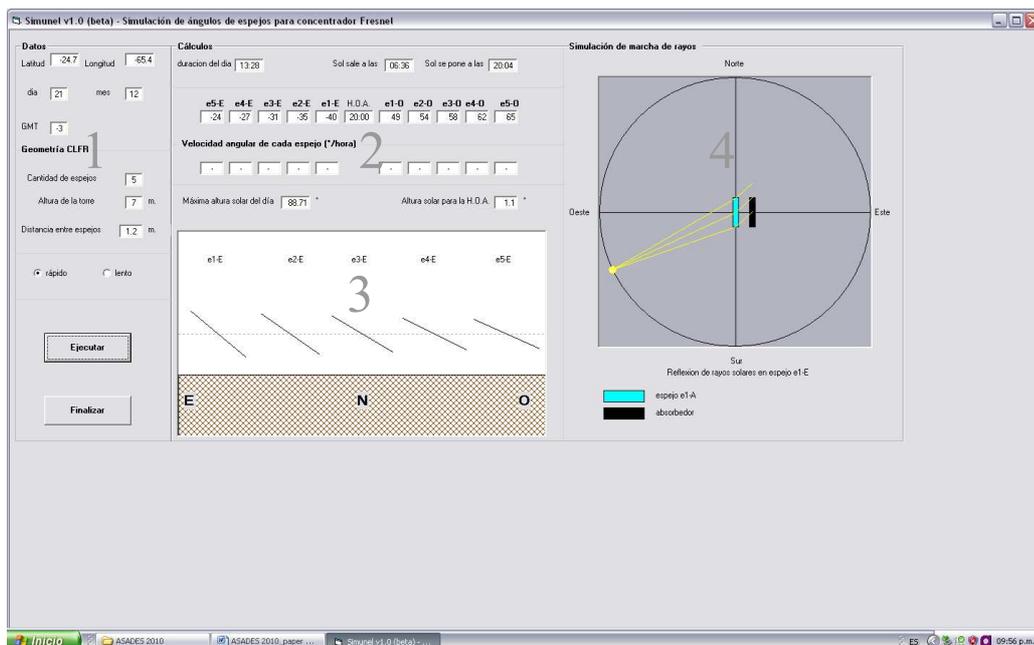


Figura 2. Pantalla de Simunel v1.0. Se han marcado con números los sectores (1, 2, 3 y 4)

Las estimaciones de *Simunel v1.0* permitieron detectar un problema en la medición de la velocidad de rotación de los espejos ($^{\circ}$ /hora) el cual se solucionó cambiando la resolución angular. La velocidad de rotación que muestra *Simunel* es el promedio de las velocidades medidas cada 4 minutos. *Simunel* toma la diferencia entre el ángulo β_{t+4m} y el ángulo β_t , calculados para los momentos t y $t+4$ minutos, y los divide por 4 minutos. Luego esa velocidad, que está en $^{\circ}$ /minutos, se pasa a $^{\circ}$ /hora. Las velocidades de rotación se aprecian en su real magnitud solo cuando se considera una resolución de 0.1° a 0.01° en la determinación del ángulo β de cada espejo. Esto indica claramente que el movimiento de los espejos es un aspecto crucial para el correcto funcionamiento del SCTF.

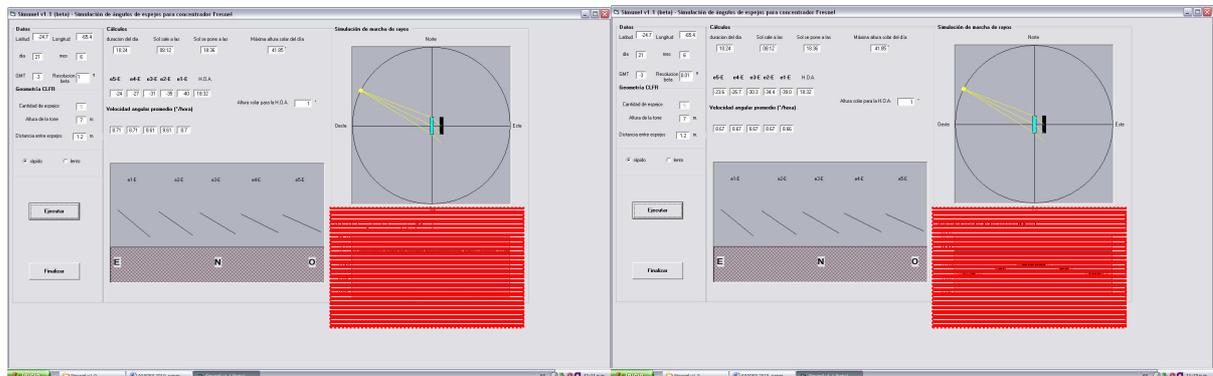


Figura 3. Pantallas de *Simunel v1.1*.

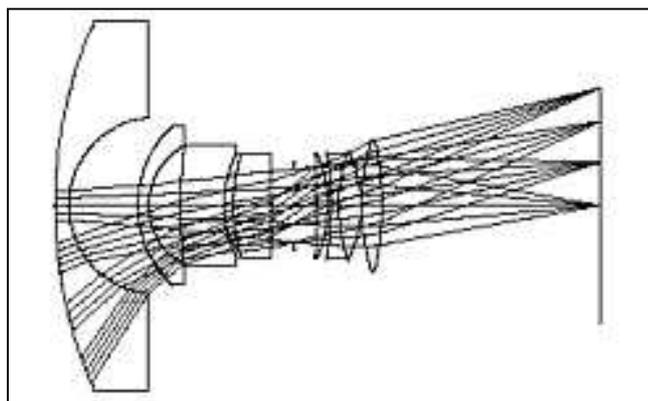
Simunel v 1.1 permite graficar la evolución de la velocidad de rotación, con un paso de 4 minutos a lo largo del día (Figura 3). Puede observarse en ambas gráficas como varía la velocidad de rotación cuando se varía la resolución del ángulo β del espejo. En el caso de la izquierda la resolución es de 1° mientras que en el de la derecha es de 0.01° . Estos cálculos están hechos para la posición de la ciudad de Salta, para el día más corto del año (21 de junio).

SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE GRANIZO (SATG)

El SCTF concentra la radiación solar directa que llega hasta sus espejos, redireccionando dicha energía hacia un absorbedor por donde circula agua. Resulta obvio suponer que si estos espejos se rompen, el sistema completo deja de funcionar o al menos no alcanza tasas razonables de producción de vapor. El primer paso en el diseño de un protocolo de contingencias es contar con una herramienta que advierta sobre la posibilidad inminente de ocurrencia de granizo.

En la región de Puna del NOA suelen suceder tormentas de verano, que ocasionalmente vienen acompañadas de granizo, de considerable tamaño. Dichas tormentas se caracterizan por ser breves pero con una descarga considerable de agua. Para determinar la inminencia o probabilidad de ocurrencia de dichos fenómenos meteorológicos, se está desarrollando actualmente un sistema de alerta temprana de granizo (SATG) basado en un sistema CCD cenital gran angular que registra imágenes del cielo.

Dicho sistema consiste de una cámara CCD acoplada a una lente gran angular tipo *ojo de pez* (Figura 4), la que se apunta al cenit para obtener una imagen lo más completa posible de la esfera celeste. De esta manera se registran imágenes del cielo



donde sería posible observar la evolución temporal de las nubes, así como su distribución espacial y su color.
 Figura 4. Esquema de marcha de rayos en un sistema de lentes gran angular tipo "ojo de pez". Se observa que la lente principal permite que el objetivo abarque un mayor ángulo sólido. La imagen obtenida en una proyección esférica sobre un plano

Existen trabajos realizados donde se ha estudiado la distribución espacial de intensidad luminosa (Giménez Rossini, 2002) o la radiación de la esfera celeste (Salazar *et al*, 2008). El primer trabajo mencionado analiza las imágenes de cielo, obtenidas acoplando una lente gran angular a una CCD para estudiar la distribución de la radiación difusa. De este trabajo podemos establecer algunos parámetros básicos para el SATG que se desarrolla, como por ejemplo:

- i) la intensidad luminosa del Sol en día claro es mucho más alta que el cielo que lo rodea. Este problema fue solucionado agregando una banda sombreadora (Figura 5).

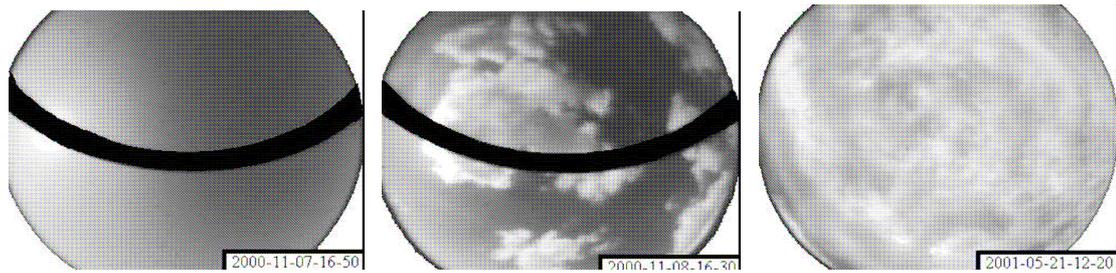


Figura 5. Imágenes cenitales de cielo. De izquierda a derecha: cielo claro, cielo parcialmente nublado y cielo nublado (Rossini, 2002)

- ii) Dado que el sistema que forma la imagen usa lentes y éstas concentran los rayos de luz en la superficie sensible de la CCD, imágenes de larga exposición de Sol en día claro dañarán el sensor CCD.
- iii) Procesadores de imágenes *ad hoc* son necesarios para determinar el valor de los píxeles de una imagen y establecer una clasificación de la luminosidad del cielo.

ALGORITMO DEL SATG

El algoritmo prototipo para el registro y análisis del sistema SATG es el siguiente:

- 1) *Registra una imagen de la esfera celeste*
- 2) *Procesamiento de la imagen*
 - 2.1) *Proyección geométrica*: al ser gran angular, la imagen obtenida contiene información tridimensional, la que se registra, deformada, en dos dimensiones. Por ello debe realizarse una transformación geométrica (proyección esférica) para establecer posiciones relativas de las nubes.
 - 2.2) *Análisis de color*: la imagen obtenida debe ser procesada para establecer color. En el caso de una imagen RGB (Red Green Blue, Rojo Verde Azul), se tienen tres capas de valores de píxeles, una para cada color.
 - 2.3) *Detección de una amenaza*: en la imagen se establecerán categorías de amenaza (**Alta**, **Mediana** y **Baja**) a partir del color. Se sabe en principio que las nubes de granizo son *Cumulus Nimbus* de color oscuro, las que resaltarían respecto de los píxeles que las rodean.
- 3) *Evolución temporal y espacial de la amenaza*: detectada una amenaza tipo **M**, el SATG cambia su frecuencia de análisis de imágenes de 10 a 5 minutos para seguir la evolución espacial de la amenaza, es decir, para ver si la nube se acerca o se aleja. Esto requiere de una subrutina que determine el camino seguido la amenaza y sus posibles posiciones futuras. Los cálculos de predicción se pueden realizar utilizando la técnica estadística conocida como ARMA (Autoregression and Moving Average).
- 4) Si la amenaza cambia de nivel **M** a **A** y se detecta que el camino futuro de la amenaza pasa por el sitio donde se encuentra el SCTF, se lanza la alarma de granizo y el sistema cambia su frecuencia de registro a 1 minuto. En ese caso queda por determinar que acciones se tomarán para proteger los espejos, como por ejemplo: taparlos o rotarlos.
 - 4.1) Si la amenaza cambia de nivel **M** a **B**, se retorna a la frecuencia normal de registro de imágenes.

Para que este algoritmo funcione de manera razonable, primero debe ser calibrado mediante campañas de medición, lo que requerirá de 3 a 6 meses de mediciones, antes de que el SATG se considere operativo. Para concretar este algoritmo deben realizarse las siguientes tareas:

- i) Desarrollo de un software integrado de análisis de imágenes: el software debe ser diseñado y escrito de manera específica para el sistema Fresnel ya que el uso de software comercial, requeriría la implementación de interfaces con el sistema de alerta. Además los sistemas comerciales ofrecen muchas herramientas que no son de utilidad para los propósitos del SATG.
- ii) Estudio y análisis de color de las nubes. Clasificación de las mismas por color a partir de rasgos conocidos (cirros, cúmulos, estratos, etc.). En esta etapa se deberán estudiar las características básicas del clima del sitio donde se construirá el SCTF.
- iii) Desarrollo de un software estadístico integrado al de imagen, para establecer las probabilidades consideradas en todos los procedimientos (distancia, trayectoria, amenaza, etc.). Implementar la técnica ARMA requiere de una gran capacidad y velocidad de cálculo, por lo que deberá preverse la disponibilidad de una computadora idónea para realizar estas tareas.

Actualmente se está en la etapa de prueba del sistema captador de imágenes. Se utiliza una webcam Topro a la que se le ha adosado una mirilla de puerta como *lente gran angular* (mirilla Dell'avo 200°). Si bien en cualquier sistema de adquisición de imágenes que usen lentes gran angular se pierde parte de la imagen por efecto de la proyección geométrica, en el caso de la mirilla de puerta, la restricción es aún mayor, por lo que deberán realizarse modificaciones para corregir este problema. Actualmente se investiga las características de las mediciones variando las condiciones de frecuencia de toma de imágenes: para registro continuo (video) y para registro discreto (*snapshot*). Esta última es la metodología adoptada por la NREL para su estación BMS (Baseline Measurement system) en Golden (Colorado) (Figura 6).

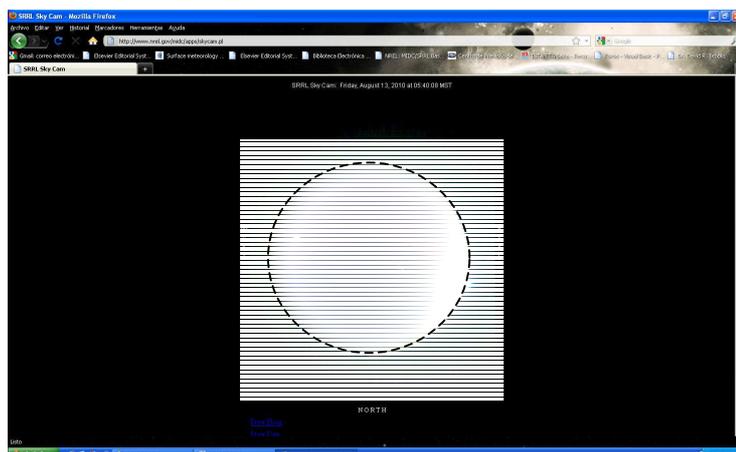


Figura 6: Foto (snapshot) tomada por una cámara cenital con lente gran angular en Golden (Colorado), para el día 13 de agosto de 2010 (www.nrel.gov/midc/apps/skycam.pl).

Obsérvese que se trata del amanecer y que esta despejado (5:40:08 MST 13/08/2010). MST es GMT -7. En esta imagen se puede apreciar la reducción mencionada anteriormente (el cuadrado es el tamaño de la foto y el círculo es la zona que la lente gran angular permite observar).

CONCLUSIONES

Dentro del proyecto de construcción y puesta a punto de un sistema concentrador Fresnel de 48 m² de área de espejos, realizados en el campo de pruebas del INENCO-Salta, se ha desarrollado una herramienta informática (programa Simunel v1.0 y v1.1) para ayudar a la determinación de la velocidad de rotación de los espejos para que los mismos desvíen la radiación solar directa hacia el absorbedor. Este programa demostró que la resolución del ángulo de cada espejo debe ser del orden de 0.01°, es decir, debe ser precisa. El sistema de alerta temprana de granizo es otro sistema de apoyo del concentrador Fresnel concebido para evitar que ese fenómeno meteorológico destruya la superficie espejada del concentrador. Para ello se están diseñando y probando los subsistemas que lo conforman (webcam con lente ojo de pez, procesador de imágenes y programa general) antes de realizar campañas de medición y de calibración.

REFERENCIAS

- Cadena C. y Echazú R. (2009). Sistema de enfoque y seguimiento para espejos planos de gran longitud. AVERMA 13, pp. 8.169-8.174
- Gimenez Rossini E. (2002). Caracterização da distribuição de intensidade da radiação solar difusa. Tesis de Maestría en Ingeniería. UFRGS (Brasil).
- Salazar G., Hernandez A. y Saravia L. (2008). Estudio de la radiación solar difusa en la bóveda celeste, utilizando kriging como método estimador. Anais do II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES – Florianópolis (Brasil). ISBN CD 978-85-62179-00-6
- Saravia L., Gea M., Fernández C., Caso R., Hoyos D., Salvo N. y Suligoy H. (2008). Diseño y construcción de un concentrador lineal Fresnel de 24 m² de área. AVERMA 12.

www.nrel.gov/midc/apps/skycam.pl

Yao Z., Wang Z., Lu Z., Wei X. (2009). Modeling and simulation of the pioneer 1MW solar thermal central receiver system in China. Renewable Energy 34, 2437–2446.

ABSTRACT

In the present paper the progress achieved in the development of systems for the design and control of a linear Fresnel concentrator constructed in the field-testing of INENCO-Salta and a system for preventing weather (hail), are shown. Simunel is a software that determines the speed of rotation of mirrors and simulates the movement of the same according to geographical location and the day of the year. The hail early warning system (SATG, in Spanish) is another system being developed, to determine the possibility of occurrence of hail. This system will issue a warning and avoid the destruction of the mirrored surface of the concentrator. This paper details the quality requirements of these systems.

Keywords: Fresnel, solar systems, hail warning.