

# Sistema de seguimiento solar de bajo costo para instalaciones fotovoltaicas domésticas

## *Low-cost solar tracking system for domestic photovoltaic installations*

**Francisco Javier Quitral Zapata**

*Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.*

*francisco.quitral@alumnos.usm.cl*

**Luis Felipe González Böhme**

*Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.*

*luisfelipe.gonzalez@usm.cl*

**Abstract:** *The ongoing research is focused on the development of a low-cost solar tracking system to improve domestic fixed PV installations which performance is dramatically diminished due to the absence of reorientation mechanisms to maximize solar energy capture. A straightforward way to reduce fabrication and maintenance costs of a domestic solar tracking system is to avoid the use of photoresistors. Most solar trackers use photoresistors to reorient their PV panels. However, the daily and seasonal solar path is well known and its variation is negligible when comparing photoresistor-based and preprogrammed reorientation against the amount of solar energy that is captured.*

**Palabras claves:** rastreador solar; autonomía energética; eficiencia energética; componentes reciclados; empoderamiento comunitario.

## Introducción

El físico experimental Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico en 1839 y Charles Fritts describió las primeras celdas hechas de selenio en 1883 (EERE, 2006). Es decir, la tecnología que permite captar y transformar la energía solar en electricidad existe hace al menos 172 años y sin embargo, su masificación es incipiente y posible exclusivamente en países desarrollados. Así lo evidencian Greenpeace y la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (2011), quienes acusan solo un 0.2% de penetración de la energía solar en la producción mundial de electricidad actualmente. En el caso de Chile –una economía emergente en América Latina– la implementación en gran escala de tecnología solar es nula a la fecha. Como se puede apreciar en el informe sobre estadísticas de operación del Sistema Interconectado Central de Chile (CDEC-SIC, 2011), el uso de energía solar ha estado ausente de la matriz energética. El estado chileno solo ha incluido instalaciones fotovoltaicas puntuales con el propósito de abastecer con electricidad a algunas localidades remotas y ha subsidiado discretamente la implementación colectiva de calentadores solares en unidades de vivienda social (PNUD, 2009). No obstante, el Ministerio de Energía de Chile acaba de aprobar 6 proyectos fotovoltaicos para el Sistema Inter-

conectado del Norte Grande (MINENER, 2011). Bajo estas condiciones se proyecta con claridad la necesidad y las ventajas de utilizar energías renovables en Chile. Sin embargo, el modelo actual para implementar esta tecnología solo considera proyectos en gran escala, que generalmente son suscritos por empresas transnacionales, que generan un gran impacto económico, político, social y ambiental. Vemos una oportunidad real de masificar incrementalmente el uso de energías renovables en Chile, en la medida en que se empodere a distintas comunidades otorgándoles autonomía energética y se legisle sobre la comercialización de los excedentes de electricidad generada en instalaciones domésticas. Una revisión preliminar de la literatura revela dos líneas de desarrollo: una, de dispositivos sofisticados para el uso de expertos y otra, de aplicaciones caseras con instrucciones DIY.

## Rastreador solar

Los fotones de radiación luminosa generan electricidad cuando interactúan con los electrones del material semiconductor del cual está compuesta una célula solar. Este fenómeno se conoce como efecto fotovoltaico (Romero, 2010). Las primeras células que se fabricaron convertían la energía solar incidente en energía eléctrica

con una eficiencia del 1 al 2%. Hoy, en cambio, se fabrican células con más de un 40% de eficiencia (Green et al., 2010). Para alcanzar tal eficiencia, Argeseanu et al. (2010) explican que la energía colectada por el panel es proporcional al coseno del ángulo entre el rayo de luz incidente y el vector normal del plano de este, por lo tanto, cuando este ángulo es cero, las pérdidas disociadas del rendimiento de la celda, tienden a cero. De este modo, se vuelve plausible usar un rastreador solar para optimizar el rendimiento de una celda solar. Argeseanu et al. (2010) sostienen que un sistema de seguimiento solar de dos ejes maximiza entre 40 y 50% la cantidad de energía por capturar, en comparación con un sistema estático.

### Definición del problema

Los sistemas de seguimiento solar operan actualmente, en su mayoría, con sensores que miden la intensidad lumínica en un conjunto discreto de orientaciones cardinales. Mediante un procesador de control, que interpreta esta información y activa un mecanismo de rotación, el campo de paneles fotovoltaicos es reorientado sucesivamente con el fin de seguir con precisión la trayectoria del sol. Intuitivamente, un modo directo de reducir el costo de fabricación y mantención de un sistema de seguimiento solar, es prescindir de estos sensores. La trayectoria del sol diaria y anual es conocida y su variación es despreciable si se compara la cantidad de energía solar capturable con sensores y con una reorientación pre-programada. Usualmente, los rastreadores solares se instalan masivamente en campos de paneles fotovoltaicos de gran extensión, lo que exige la instalación de potentes dispositivos electromecánicos, que por su dimensionamiento, requieren de grandes bancos de baterías, cajas reguladoras de voltaje e inversores. La instalación de rastreadores solares de menor tamaño en sistemas fotovoltaicos distribuidos, potencialmente permitiría reducir de manera considerable los costos de implementación. Adicionalmente, el uso de componentes reciclados y de plataformas para la creación de prototipos basada en software y hardware de código abierto, ofrecería nuevas oportunidades para la masificación de esta tecnología.

### Modelo lógico

Un primer acercamiento al problema de describir la órbita solar, se realizó mediante un modelo matemático definido por Sarmiento (2007), que especifica las

variables y ecuaciones con suficiente aproximación para aplicaciones de ingeniería, pero difícilmente aplicables a algoritmos que se puedan traducir en un lenguaje de programación de computadores. Consecuentemente, se utilizaron las ecuaciones definidas por Meeus (1991), aplicadas en una calculadora de posición solar (NOAA, 2011b) y en una rutina y hojas de cálculo elaboradas por la agencia norteamericana NOAA (2011a), para determinar datos solares en un día, año y lugar específicos. Estas ecuaciones permiten una exactitud de un minuto sexagesimal para el área comprendida entre los  $\pm 72^\circ$  de latitud y de diez minutos sexagesimales fuera de esas latitudes –precisión suficiente para eliminar errores asociados al cálculo. A continuación se listan y describen algunas de las variables y funciones relevantes que se emplearon en el modelo lógico (ver Fig.1):

- **Latitud (lat):** Distancia angular que hay desde un punto de la superficie terrestre al Ecuador, medida en grados sexagesimales. Variable independiente con dominio continuo  $[-90^\circ..90^\circ]$ . Latitud Sur corresponde al subdominio negativo y latitud Norte al positivo.
- **Longitud (long):** Distancia angular medida entre el meridiano de un punto y otro tomado como referencia en el Ecuador. Variable independiente con dominio continuo  $[-180^\circ..180^\circ]$ . Longitud Oeste corresponde al subdominio negativo y longitud Este al positivo.
- **Resolución (res):** Intervalo de tiempo entre iteraciones. Medido en minutos. Variable independiente con dominio discreto  $[1, 3, 5]$ .
- **Elevación Solar (ES):** Ángulo formado por el sol respecto al plano horizontal. Variable dependiente, con dominio continuo  $[0^\circ..360^\circ]$
- **Azimut Solar (AS):** Ángulo medido sobre el plano horizontal que forman el punto cardinal norte y la proyección vertical del sol sobre el horizonte. Se mide en grados desde el norte en el sentido de las agujas del reloj. Variable dependiente con dominio continuo  $[0^\circ..360^\circ]$
- **Mover Motor:** Instrucciones que permiten posicionar el eje del motor en un ángulo específico. Depende de la interfaz y del tipo de motor que tan preciso sea este procedimiento.
- **Funciones  $F_()$ :** Funciones detalladas por (Meeus, 1991), (NOAA, 2011b) y (NOAA, 2011a), que permiten calcular la hora del amanecer y del ocaso, los ángulos de elevación (ES) y azimut solar (AS), para una latitud, longitud, hora, día y mes específicos.

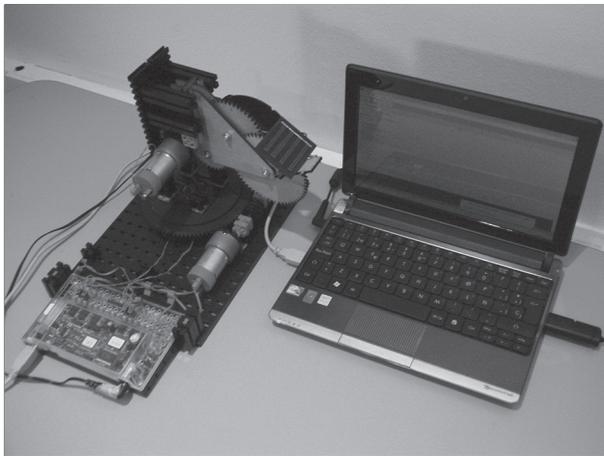
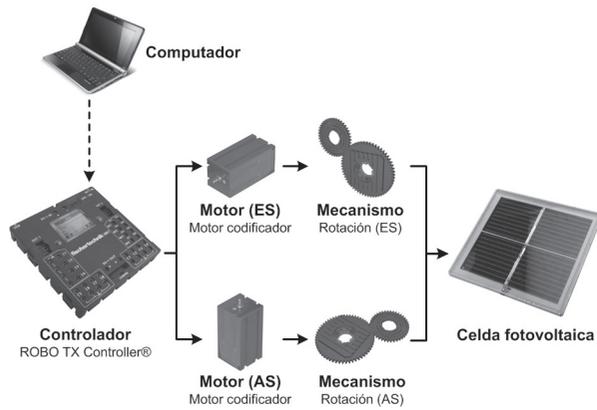


Fig.1 Modelo lógico.

### SOFIA: un modelo de prueba de concepto

La prueba de concepto fue realizada en el marco de una investigación sobre el empleo de juegos de construcción y robótica pedagógica en la enseñanza de arquitectura (González et al., 2011), inspirada en el trabajo previo de Donath and Thurow (2003). En la construcción del primer modelo físico SOFIA se utilizaron bloques de construcción y componentes incluidos en los paquetes ROBO Starter®, ROBO Mobile Set® y ROBO TX Training Lab® de Fischertechnik®. SOFIA fue mejorada posteriormente con la inclusión de piezas hechas a medida por fabricación CNC y una celda fotovoltaica de pequeña envergadura. En la programación de SOFIA se usó inicialmente el lenguaje de programación visual ROBO PRO® y posteriormente, el lenguaje de programación interpretado Python® (ver Fig.2).

## Resultados preliminares

SOFIA puede posicionarse en ángulos a intervalos de  $4,8^\circ$ , lo que implica una desviación máxima de  $2,4^\circ$  con respecto a la posición del sol. Este error está condicionado por el uso de los motores codificadores de Fischertechnik®, los cuales funcionan con un sensor, que genera 3 impulsos por cada vuelta del eje del motor. Pero además, estos motores incluyen una caja de engranes con una relación de transmisión de 25:1, i.e. una vuelta del eje que proviene del engranaje equivale a 25 vueltas del eje del motor, generando 75 impulsos del sensor, lo que finalmente se traduce en pasos de  $4,8^\circ$ . Con este grado de precisión en su reorientación, el área efectiva de exposición al sol del panel utilizado en SOFIA es de un 99,9% en su condición más desfavorable. Esto quiere decir que la desviación de  $2,4^\circ$  provocada por los motores es despreciable con respecto a la eficiencia de captación solar del panel y que se puede prescindir de sensores en instalaciones fotovoltaicas domésticas. Además, el número de iteraciones que debe realizar el algoritmo de control de los motores se reduce, lo que se traduce en menos activaciones diarias del rastreador solar y menor consumo eléctrico.

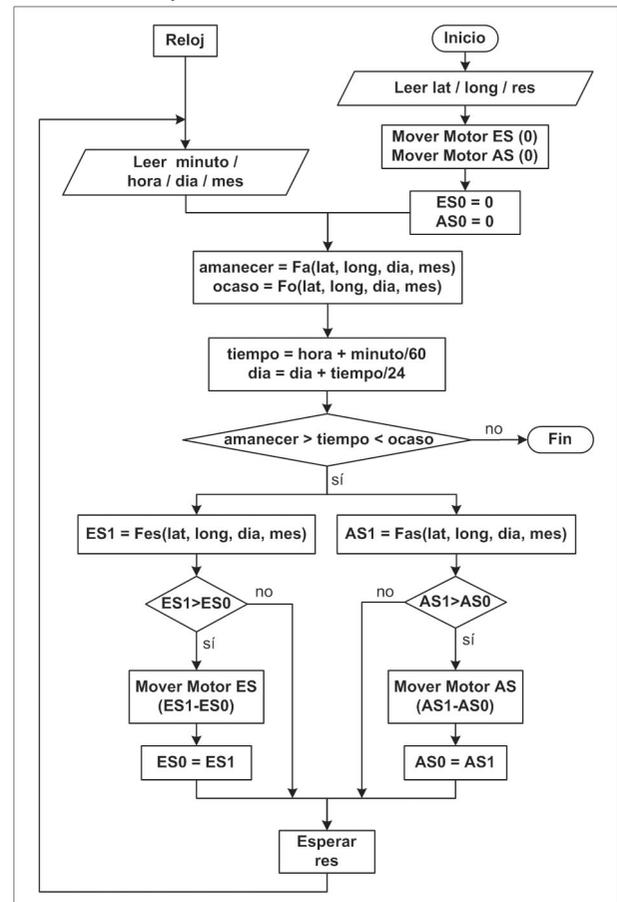


Fig.2 Modelo de prueba de concepto SOFIA

## Discusión y trabajo futuro

Si bien SOFIA permitió validar el modelo conceptual, se revelaron algunas limitaciones implícitas que deberán ser consideradas en la construcción de un rastreador solar de bajo costo para instalaciones fotovoltaicas domésticas. Una de ellas es que el lenguaje de programación visual ROBO PRO® no permite traducir el algoritmo de cálculo de posición del sol (ver Fig.1) y por consiguiente, resulta apropiado reemplazarlo por otro lenguaje multi-paradigma, como e.g. el de programación interpretado Python®. No obstante, al usar Python® se requiere importar librerías de código (Müller, 2011) si se quiere controlar los motores codificadores de Fischertechnik®. También se deben considerar los esfuerzos de torsión necesarios para que los motores logren reorientar un panel solar de dimensiones mayores. Otro aspecto limitante por investigar, es como calibrar el rastreador solar en su instalación e inicialización del sistema en su posición geográfica definitiva. El futuro desarrollo de la investigación contempla la implementación del modelo conceptual en la plataforma de electrónica abierta Arduino® y el uso de motores paso a paso, recuperados de impresoras de inyección de tinta desechadas. Una potencial aplicación se planea con el desafío de sustentar energética y económicamente el consumo eléctrico de pequeñas escuelas de educación primaria en zonas remotas de Chile. Iniciativa de este orden podrían complementar los planes del estado chileno para el reacondicionamiento térmico de vivienda social en uso y nueva, como Vive con Buena Energía y el Plan Nacional de Calentadores Solares, que incluye beneficios tributarios para aquellas empresas que construyan vivienda social equipada con esta tecnología.

## Agradecimientos

El trabajo presentado aquí no habría sido posible sin la estrecha colaboración de Sussan Carrasco, Belén Vera y Juan Pablo Fernández de la Escuela de Ayudantes de Investigación (EAI, 2011)

## Referencias

- Argeseanu, A., Ritchie, E. & Leban, K. New low cost structure for dual axis mount solar tracking system using adaptive solar sensor. 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2010 Brasov, Romania. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1109-1114.

- CDEC-SIC. 2011. *Estadísticas de operación 2001/2010*. CDEC-SIC Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central. Recuperado en Septiembre de 2011, de: [http://www.cdec-sic.cl/datos/anuario2011/espanol/xlsesp/cdec\\_sic\\_espanol\\_2011.pdf](http://www.cdec-sic.cl/datos/anuario2011/espanol/xlsesp/cdec_sic_espanol_2011.pdf)
- Donath, D. & Thurow, T. 2003. *Ich Roboter, Blockkurs zu CAAD - Spezialkenntnisse Modul 1.2*. Chair Computer Science in Architecture, Bauhaus-Universität Weimar. Recuperado en Septiembre de 2011, de: [http://infar.architektur.uni-weimar.de/alte\\_webseite\\_2/deu/lehre/archiv/module/ws03/modul\\_12/index.html](http://infar.architektur.uni-weimar.de/alte_webseite_2/deu/lehre/archiv/module/ws03/modul_12/index.html)
- EAI. 2011. *Escuela de ayudantes de investigación*. Departamento de Arquitectura UTFSM. Recuperado en Septiembre de 2011, de: <http://www.arq.utfsm.cl/lineas-y-unidades/escuela-de-ayudantes-eai/>
- EERE. 2006. *The history of solar*. Energy Efficiency & Renewable Energy, United States Department of Energy Recuperado en Septiembre de 2011, de: [http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf)
- González, L. F., Maino, S., Carrasco, C. & Solís, R. Juegos de construcción & robótica pedagógica en la formación de arquitectos con competencia en CyT. XXV Congreso Chileno de Educación en Ingeniería, 26/28 October 2011 Antofagasta, Chile. SOCHEDI, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte.
- Green, M., Emery, K., Hishikawa, Y. & Warta, W. Solar cell efficiency tables (version 36). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2010. 346-352.
- GREENPEACE. 2011. *Solar generation 6: Solar photovoltaic electricity empowering the world*. Greenpeace and EPIA European Photovoltaic Industry Association Recuperado en Septiembre de 2011, de: <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20lr.pdf>
- Meeus, J. 1991. *Astronomical algorithms*, Virginia, Willmann-Bell Inc.
- Minener. 2011. *Proyecto fotovoltaico "Planta Salar de Huasco 30 MW" fue aprobado por el CEA de Tarapacá*. Ministerio de Energía de Chile. Recuperado en Septiembre de 2011, de: <http://www.minenergia.cl/ministerio/noticias/regionales/proyecto-fotovoltaico-planta-salar-de.html>.
- Müller, U. 2011. *Python-Ecke*. Recuperado en Septiembre de 2011, de: <http://www.ftcomputing.de/pytho-neck.html>
- NOAA. 2011a. *Solar calculation details*. National Oceanic

- and Atmospheric Administration, US Department of Commerce. Recuperado en Septiembre de 2011, de: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/calcdetails.html> .
- Noaa. 2011b. *Solar calculator* . National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce. Recuperado en Septiembre de 2011, de: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>
  - Pnud. 2009. *Programa Nacional de Chile bajo la Iniciativa Global de Fortalecimiento y Transformación del Mercado de Colectores Solares Térmicos* . Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Ministerio de Energía de Chile. Recuperado en Septiembre de 2011, de: <http://www.pnud.cl/proyectos/fichas/colector-solar-termico.asp>
  - Romero, M. 2010. *Energía solar fotovoltaica*, Barcelona, Ediciones CEAC.
  - Sarmiento, P. 2007. *Energía solar en arquitectura y construcción*, Santiago, RIL editores.