

# Modelado de Alta Precisión en el Cálculo de la Orientación Solar

Rodolfo G. Cionco<sup>(1)</sup>, Nancy E. Quaranta<sup>(1)</sup>, Marta G. Caligaris<sup>(1)</sup>, Rosa H. Compagnucci<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, Colón 332 (2900), San Nicolás, Argentina, Tel. #54 - 3461- 420830 / 425266, gcionco@frsn.utn.edu.ar

<sup>(2)</sup> Universidad de Buenos Aires, Dto. de Cs. de la Atmósfera y los Océanos, Ciudad Universitaria, Pabellón 2 (1428), Ciudad de Buenos Aires, rhc@fcen.uba.ar

**Resumen** - El cálculo de la orientación del Sol respecto a un determinado punto espacio-temporal (terrestre u orbital) es la base para el aprovechamiento del recurso solar. El avance en las aplicaciones tecnológicas exige una continua reducción en la incerteza con que la posición del Sol es determinada. En este trabajo se presenta una serie de algoritmos basados en una reciente efemérides planetaria. Estos algoritmos permiten un error menor que 0,01 grados en las coordenadas que posicionan al Sol en la esfera celeste, y han sido implementados en un programa de código abierto.

**Palabras Claves:** Modelado y control, dinámica, orientación solar, energía solar

## High Precision Modelling For Solar Tracking Calculations

**Abstract** - The calculation of the orientation of the Sun with respect to a particular space-time point (terrestrial or orbital) is the basis for the use of solar resources. Progress in technological applications requires a continuous reduction in the uncertainty with which the Sun's position is determined. This paper presents a series of algorithms based on a recent planetary ephemeris, which allows an error of less than 0.01 degrees in the coordinates that locate the Sun on the celestial sphere, and have been implemented in an open source program.

**Keywords:** Modelling and control, dynamics, solar tracking, solar energy

## INTRODUCCIÓN

La exactitud con que se efectúa el seguimiento solar depende del grado de incerteza requerida por el dispositivo concentrador; no obstante, varios sistemas actuales requieren gran precisión (Reda y Andreas, 2004). Por otra parte, diversos autores (ver por ejemplo, Artero et al., 1997; Righinni y Grossi-Gallegos, 1999) han tratado el tema de cómo determinar la orientación óptima de un colector fijo. En nuestro país, este es un tema muy significativo para el aprovechamiento de la energía solar debido a la importante distribución en latitud que presenta Argentina.

Sin embargo, cuando es posible mantener dispositivos orientables, pueden programarse algoritmos muy sencillos para su control. En lo que sigue se presenta una receta: qué y cómo hacer para obtener la posición del Sol con error menor que 0,010° mediante el uso de algoritmos sencillos. Para esto se utiliza la efemérides planetaria INPOP06 (Fienga et al., 2008); además se propone un cálculo vectorial en la determinación de las posiciones en vez del uso habitual de trigonometría esférica. Se supone al lector medianamente familiarizado con el tema.

El vector posición aparente del Sol respecto a un sistema horizontal, puede escribirse

$$P = P(z, A) \quad (1)$$

donde  $z$  y  $A$  son la distancia zenital y el azimut, bien conocidos ángulos de posición sobre la esfera celeste; éstos pueden ponerse como función del tiempo ( $t$ ) u hora legal (HL) y variables de traslación terrestre ( $vt$ ), es decir:

$$z = z(t, vt), A = A(t, vt) \quad (2)$$

La rotación terrestre está también involucrada en la variable  $t$  debido a que la escala de HL (el Tiempo Universal Coordinado, TUC) está relacionada con la escala rotacional de Tiempo Universal.

## DESARROLLO DEL TRABAJO

### Primer paso: el tiempo

El tiempo de la dinámica, Tiempo Dinámico Terrestre (*TDT*) no es el tiempo del reloj ( $t$ , el cual se mide en escala *TUC*), por lo tanto debe transformarse de *TUC* a *TDT*.

$$TDT = TUC + 32,184 \text{ s} \quad (3)$$

habiéndose previamente transformado de HL al tiempo TUC (ver por ejemplo, Cionco et ál., 2007).

### Posición baricéntrica de la tierra

La efemérides INPOP06 da las coordenadas cartesianas de la Tierra como expansiones de polinomios de Chebishev.

$$x(t_j) = \sum x_i T_i(t_j), \quad (4)$$

donde  $x(t_j)$  es la coordenada cartesiana correspondiente del planeta;  $x_i$  son los coeficientes proporcionados por INPOP06 y  $T_i(t_j)$  son los polinomios de Chebishev (o Chebishev-Hermite) generados por el usuario, que se obtienen mediante las conocidas fórmulas de recurrencia. El tiempo  $t_j$  es el tiempo juliano que se obtiene con *TDT* y el día juliano para la fecha correspondiente.

### Variables de traslación: longitud geocéntrica del sol

La posición de la Tierra en su órbita queda determinada por la longitud media de la fecha  $\lambda_T$  (coordenada angular en la elipse terrestre), que se obtiene a partir de las coordenadas (Ec. 4). Para posicionar al Sol respecto al centro terrestre, se tiene la longitud geocéntrica

$$\lambda_S = \lambda_T + 180^\circ. \quad (5)$$

Dado que interesa la posición en la esfera celeste (esfera de radio unitario), el vector posición del Sol en un sistema cartesiano ecliptical geocéntrico será

$$P_E = (\cos \lambda_S, \text{sen } \lambda_S, 0). \quad (6)$$

En lo que sigue todos los vectores  $P_i$  indican la posición del Sol desde el sistema  $i$ , recordar que su módulo  $P_i$  es siempre unitario.

### Pasaje al sistema ecuatorial celeste

Mediante una rotación alrededor del eje  $x$  un ángulo  $\varepsilon$  = oblicuidad de la eclíptica (en sentido inverso), el vector  $P_E$  puede expresarse en un sistema cuyo plano fundamental es el ecuador, estando el eje  $x$  dirigido al

equinoccio vernal. Realizando el producto matricial correspondiente se tiene:

$$P_Q = (\cos \lambda_S, \text{sen } \lambda_S \cos \varepsilon, \text{sen } \lambda_S \text{sen } \varepsilon) \tag{7}$$

Antes deben aplicarse correcciones en longitud y oblicuidad por efecto de la precesión y nutación luni-solar y aberración de la luz para obtener valores verdaderos para el instante de cálculo.

**Pasaje al sistema horizontal a través del ecuatorial local**

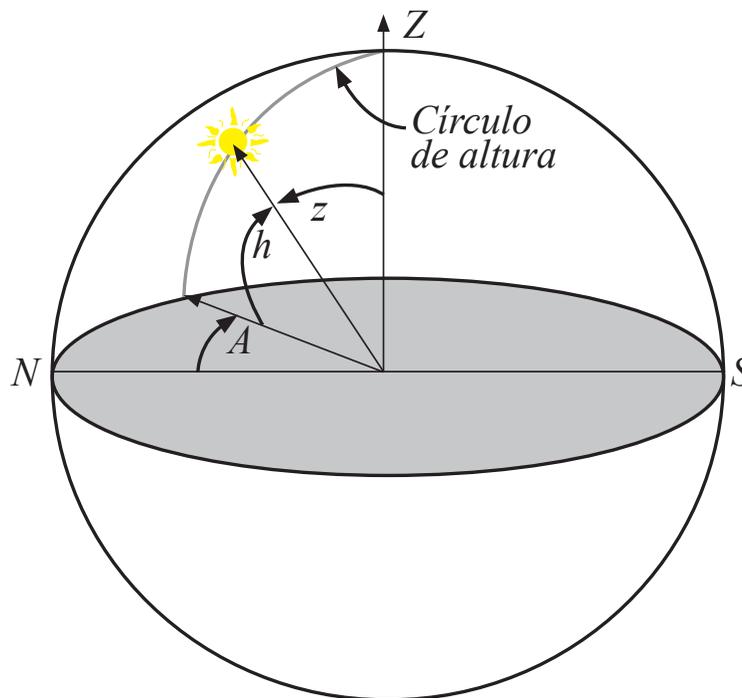
Mediante otra rotación, teniendo en cuenta la latitud del lugar  $\varphi$  y el ángulo horario  $H$ , puede expresarse el vector posición en un sistema horizontal

$$P_H = (-\cos \delta \text{sen } H, \text{sen } \delta \cos \varphi - \cos \delta \text{sen } \varphi \cos H, \cos \delta \cos \varphi \cos H + \text{sen } \delta \text{sen } \varphi), \tag{8}$$

con

$$\delta = \arcsen (\text{sen } \lambda_S \text{sen } \varepsilon). \tag{9}$$

El sistema horizontal (Fig. 1) es el más familiar para el observador y está caracterizado por las coordenadas  $z$  y  $A$  ya mencionadas.



**Fig. 1** - Sistema horizontal: el eje x está dirigido al Este; el y al Norte; el plano fundamental es el horizonte (gris); se indica el azimut  $A$ , la altura  $h$  y su complemento, la distancia zenital  $z$

### Obtención de las coordenadas horizontales

A partir de la Fig.1 es inmediato que:

$$\cos z = P_z / P_H \quad (10)$$

### Obtención de las coordenadas horizontales

A partir de la Fig.1 es inmediato que:

$$\cos z = P_z / P_H \quad (11)$$

siendo  $P_z$  la componente z de  $P_H$ , por lo tanto

$$\cos z = \cos \delta \cos \varphi \cos H + \sin \delta \sin \varphi. \quad (12)$$

El ángulo horario  $H$  puede estimarse de varias maneras. Aquí se sugiere, para no perder precisión, relacionarlo con coordenadas de posición solar, esto es:

$$\cos H = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta, \quad (13)$$

que se obtiene mediante el uso de trigonometría esférica. Para el azimut se tiene

$$\cos A = P_y / \sin z, \quad (14)$$

siendo  $P_y$  la componente y del vector  $P_H$ ; resulta, operando

$$\cos A = \sin \delta \operatorname{cosec} z \sec \varphi - \operatorname{cotg} z \operatorname{tg} \varphi.$$

De esta forma se obtienen  $z$  y  $A$  para un instante de tiempo determinado.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una serie de algoritmos para calcular la posición del Sol sobre la esfera celeste mediante coordenadas horizontales usando la sofisticada efemérides planetaria INPOP06. Además, las sucesivas transformaciones entre los distintos sistemas de referencia se han dado en forma vectorial, a diferencia del uso más común basado en trigonometría esférica. Esto agiliza la comprensión de la problemática para usuarios que no provienen de las ciencias astronómicas.

Utilizando los algoritmos descriptos, la posición del Sol se obtiene con una precisión mejor que  $0,01^\circ$ . Para ver esto basta comparar con las tablas de The Astronomical Almanac (2010).

Existen infinidad de detalles entre los pasos indicados, todos ellos y las prescripciones sugeridas, estarán en breve a disposición de los usuarios en un paquete ForTran bajo GNU-Linux.

La parte más engorrosa de todo este cálculo es la obtención de las posiciones planetarias para un instante dado. Ésto se resuelve con rapidez y precisión mediante el uso de polinomios de Chebishev, que se encuentran implementados en rutinas como las presentadas en Press et al. (1992), las cuales se utilizan en el código ForTran del paquete mencionado.

## AGRADECIMIENTOS

Rodolfo Cionco y Rosa Compagnucci agradecen el apoyo recibido a través de los proyectos PID-UTN 1351 y PID 2007 – 00438 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT).

## REFERENCIAS

Artero, Caram, Rauek, Stezak, y Esteves, “Radiación solar sobre planos inclinados. Evaluación de dos métodos de cálculo”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1 (1), 221-224, (1997).

Cionco, Caligaris y Quaranta, 2007. Herramientas de cálculo de la orientación solar, Capítulo 10, “Modelización aplicada a la Ingeniería”, Volumen II, 248-265. Editores: Walter Legnani, Pablo Jacovkis y Ricardo Armentano., (2007).

Fienga, Manche, Laskar, y Gastineau, “INPOP06: a new numerical planetary ephemeris”, *Astronomy & Astrophysics*; 477, 315–327, (2008).

Righini, y Grossi Gallegos, “Ángulos sugeridos para optimizar la colección anual de irradiación solar diaria en Argentina sobre planos orientados al norte”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 3 (2), 11.33 -11.37,(1999).

Press, Teukolsky, Vetterling, y Flannery, *Numerical Recipes in FORTRAN: the art of scientific computing*, 2da ed., Cambridge University Press, (1992).

The Astronomical Almanac. Washington DC: US Government Printing Office, (2010).

Reda y Andreas, “Solar position algorithm for solar radiation applications”. *Solar Energy*; 76, 577–589, (2004).