

DESARROLLO DE ALGORITMOS DE CONTROL DE UN SISTEMA SEGUIDOR PARA MEDICIÓN DE LAS COMPONENTES DE LA RADIACIÓN SOLAR

MAYER, Manuel; Dr. CÁCERES, Manuel; Dr. FIRMAN, Andrés D.; Dr. VERA, Luis Horacio (*)

RESUMEN

Conocer como varía el recurso solar en una determinada región es fundamental al momento de proyectar, dimensionar, implementar y caracterizar sistemas que aprovechan esta fuente de energía. En este aspecto, el sistema de seguimiento solar (*solar tracker* o seguidor solar), es un elemento esencial ya que permite orientar sensores para medición de las tres componentes de la radiación que incide sobre la superficie terrestre (directa, difusa, y albedo).

Existen distintos tipos de seguidores solares, siendo el adecuado para esta tarea aquel que posee dos grados de libertad e independencia con las condiciones climáticas. Para alcanzar esta independencia, el sistema de control que gobierna el dispositivo debe estar basado en ecuaciones de geometría solar. Sin embargo, en el proceso de diseño de un determinado seguidor solar, es conveniente conocer los requerimientos mínimos necesarios respecto a la resolución tanto electrónica como mecánica que deben poseer sus componentes, para que el sistema sea capaz de cumplir satisfactoriamente con la tarea para la cual ha sido concebido.

Con el objetivo de desarrollar un seguidor para medición de las componentes de la radiación solar, este estudio presenta el desarrollo de algoritmos de control, basados en ecuaciones de geometría solar, que permiten determinar a través de resultados de simulación, los requerimientos necesarios para minimizar los errores de orientación del sistema seguidor. De esta manera, se puede delimitar el error de orientación esperado e inferir su aporte al error global en la medición de las diferentes componentes de la radiación.

Los resultados obtenidos a través de los modelos desarrollados fueron contrastados con información que proporciona la NASA de manera gratuita, de esta manera, proporcionaron

(*) Grupo en Energías Renovables. Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agrimensura. UNNE. Avenida Libertad 5460- CP 3400 Corrientes.

Email: manuel_mayer@hotmail.com; Teléfono: 3624-785635

Email: ingmanuelcaceres@hotmail.com; Teléfono: 3794-268000

Email: afirman@ger-unne.com.ar; Teléfono: 3794-400227

las bases para el diseño del sistema seguidor, que está siendo implementado en el Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos del Departamento de Ingeniería de la FaCENA.

Palabras Claves: Seguidor Solar, Geometría Solar, Vector Solar, Irradiancia, Componente Directa.

INTRODUCCION

El aprovechamiento de la energía solar está en continuo crecimiento a nivel mundial. La radiación solar se puede aprovechar de dos maneras: por conversión fotovoltaica en energía eléctrica, a través de paneles o por conversión térmica, empleando dispositivos que colectan y/o concentran la radiación solar ya sea para calentar agua, o generar electricidad calentando un fluido que al evaporarse sea capaz de mover turbinas acopladas a generadores eléctricos.

Para dimensionar correctamente estos sistemas, evaluar sus costos e inferir condiciones de operación es necesario contar con información que presente la distribución espacial y temporal del recurso solar.

Aunque la radiación solar es medida en muchas estaciones meteorológicas automáticas, ya sea pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional, al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), a Universidades Nacionales, o a usuarios particulares vinculados con la actividad agropecuaria, aún falta un organismo que centralice la información, verifique la consistencia de los datos y calibre regularmente los sensores. Tampoco hay en la actualidad un plan nacional que vaya en ese sentido, aunque contar con datos de radiación solar sea cada vez más necesario.

Los actores que participan en proyectos que contemplan el aprovechamiento de la energía solar como fuente primaria deben recurrir a información histórica, sin embargo, esta no se encuentra disponible a nivel local (La NASA provee información satelital de irradiación entre el año 1982 y el año 2005).

Actualmente en la Argentina, la única información detallada con la que se cuenta al respecto deriva del trabajo realizado por Grossi Gallegos y Righini, que presentan las cartas mensuales con la distribución espacial del promedio de la irradiación solar global diaria del país. Los valores de los promedios de la radiación solar global diaria están expresados en kWh/m²-día teniendo en cuenta la demanda habitual de los diseñadores de sistemas de conversión fotovoltaica (Grossi Gallegos, Righini, 2007).

La información proporcionada por el siguiente mapa (*Figura 1*) es insuficiente para inferir la producción de energía que se puede alcanzar, puesto que la resolución establecida en los niveles de irradiación en un determinado punto de una región es insuficiente.

En este contexto, salta a la vista la necesidad de realizar trabajos de I+D+i orientados al desarrollo de sistemas que permitan caracterizar el recurso y metodologías orientadas a

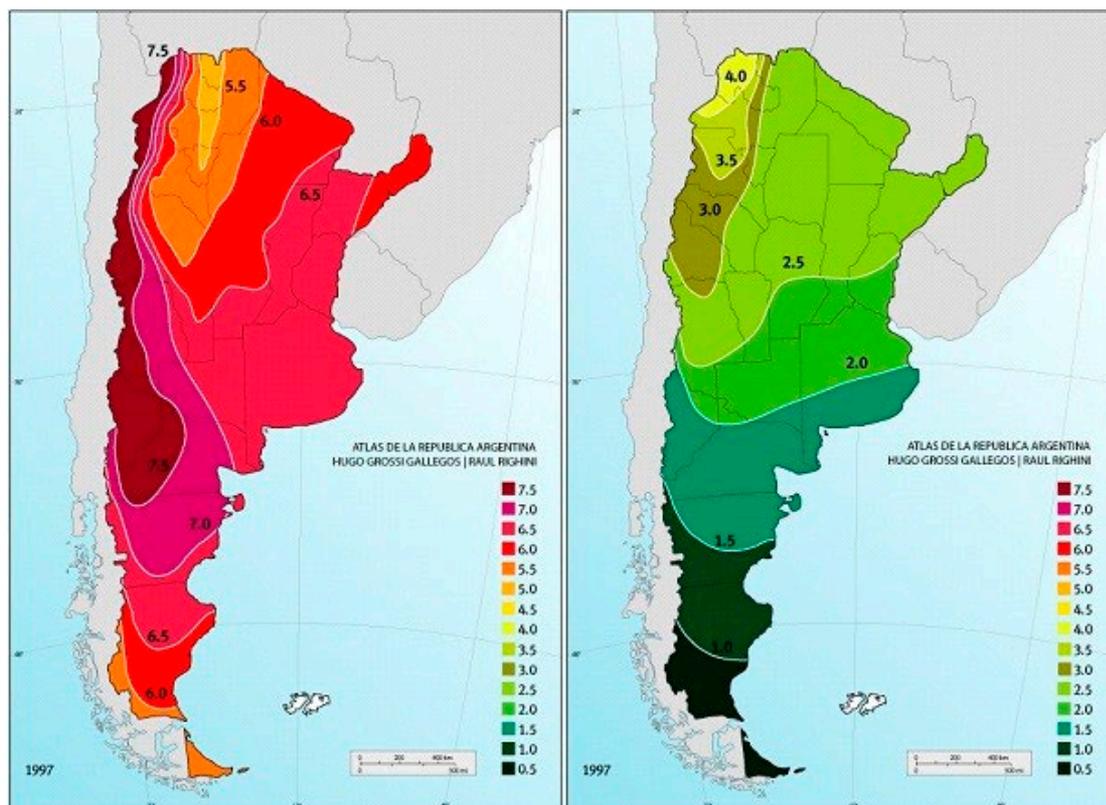


Figura 1. Distribución espacial del promedio de la irradiación solar global diaria (kWh/m^2). A) Mes de enero. B) Mes de junio.

unificar la información obtenida. Un dispositivo necesario para realizar una correcta caracterización del recurso es el seguidor solar, componente tecnológico que, a través de sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos sigue la trayectoria del Sol y permite posicionar diversos sensores en la dirección de incidencia de la radiación solar. Es también utilizado para optimizar la cantidad de energía obtenida en las instalaciones fotovoltaicas, ya que permite aumentar la irradiación diaria incidente sobre los módulos maximizando la captación y por ende la energía suministrada a la instalación (Mousazadeh H, 2009).

Este trabajo tiene como objeto el desarrollo de algoritmos de control que permiten determinar, a través de resultados de simulación, los requerimientos necesarios para minimizar los errores de orientación de un sistema seguidor. Estos requerimientos serán utilizados como marco en el desarrollo e implementación de un seguidor solar de dos ejes cuyo sistema de control será capaz de calcular la posición del Sol, a partir de los datos de latitud, longitud y tiempo provistos por un módulo electrónico de posicionamiento satelital (GPS), y determinar las acciones necesarias para posicionar una plataforma en la dirección del sol, a partir de un esquema mecánico basado en motores paso a paso asociados a cajas de reducción.

SEGUIDORES SOLARES

Los seguidores solares pueden ser clasificados según el tipo de movimiento que realicen y según el algoritmo de seguimiento que emplea su etapa de control (Prinsloo G, 2015).

Según su tipo de movimiento:

- Seguidores a un eje: Presentan un grado de libertad en su movimiento. La rotación de la superficie de captación se hace sobre un solo eje, este puede ser horizontal, vertical u oblicuo. Este tipo de seguimiento presenta un grado de complejidad reducido, sin embargo, su principal limitación radica en que solo realiza un seguimiento completo de la trayectoria solar con un único grado de libertad.
- Seguidores a dos ejes: Poseen dos grados de libertad lo que les permite realizar un seguimiento de la trayectoria solar más preciso y completo. Si se utiliza en instalaciones de generación de energía, son los que mayor rendimiento proveen en comparación con los de un solo eje.

Según su algoritmo de seguimiento:

- Seguidores por punto luminoso: Poseen un sensor que les indica cual es el punto del cielo más luminoso y al que deben apuntar. El algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal integrada por uno o más sensores. Dependiendo de dicha señal el sistema de control acciona uno o varios motores para posicionar la superficie de captación en la dirección apropiada.
- Seguidores con programación astronómica: Mediante un algoritmo basado en ecuaciones matemáticas determinan la dirección exacta del Sol en un instante de tiempo determinado (función de la fecha y hora). Con esta información, el sistema de control posiciona la superficie de captación. Este control presenta total independencia de las condiciones climáticas. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier momento.

ECUACIONES DE GEOMETRÍA SOLAR

Los sistemas de coordenadas horizontales y horarias permiten conocer la posición del Sol respecto a un punto de la Tierra, en un instante dado. En el primer sistema, la posición viene dada por dos coordenadas, el cenit y el acimut, y por la declinación y el ángulo horario en el segundo. Estos dos pares de coordenadas definen el triángulo esférico astronómico cuya resolución proporciona la expresión de la altura del Sol en función de la latitud, declinación y del ángulo horario; y el acimut en función de la altura, la declinación y el ángulo horario (Bilbao J, 1992; Reda I, 2008).

Declinación (δ): Es el ángulo que forma el eje polar terrestre, con el eje de la elíptica que forma el movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Es cero en los equinoccios y varía entre $\pm 23,5^\circ$. En el hemisferio Sur es menor que cero en verano, cuyo valor mínimo $-23,5^\circ$ alcanza en el solsticio del 21 de diciembre. Se considera constante a lo largo del día.

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 * \cos \Gamma + 0,070257 * \sin \Gamma - 0,00675 * \cos 2\Gamma + 0,000907 * \sin 2\Gamma - 0,002697 * \cos 3\Gamma + 0,00148 * \sin 3\Gamma$$

Donde Γ , en radianes, se conoce como ángulo del día, y dn día del año.

$$\Gamma = 2\pi \frac{dn}{366}$$

Tiempo Solar Verdadero (TST) y ángulo horario (ω): El tiempo solar verdadero en un lugar se define como el ángulo horario ω del Sol en ese lugar. Se toman las 12:00 horas cuando $\omega=0$ rad. Para obtener la relación entre el TST, y el tiempo civil T_c , es decir el que marcan los relojes en aquel lugar, se deben introducir las siguientes correcciones:

- Ecuación del tiempo: Corrige la excentricidad de la órbita de la Tierra y que la velocidad areolar del Sol en su movimiento aparente no es constante.

$$Et = 0,0002 - 0,4197 \cos \Gamma + 3,2265 * \cos 2\Gamma + 0,0903 * \cos 3\Gamma + 7,3509 \sin \Gamma + 9,3912 * \sin 2\Gamma + 0,3361 * \sin 3\Gamma$$

- Debido a la diferencia en la longitud entre el meridiano local y el que se toma como origen, el meridiano de Greenwich se debe corregir, siendo λ_o la longitud del meridiano de origen, y λ la del meridiano local. El signo menos es para todo punto situado al Oeste del meridiano cero.

$$\Delta\lambda = \frac{24}{360} * (\lambda \pm \lambda_o) = 4 * (\lambda \pm \lambda_o)$$

Finalmente:

$$TST = (T_c * 15) - Et + \Delta\lambda$$

Una rotación completa de la Tierra, 360° , se realiza en 24h, por lo tanto, este resultado se expresa en horas dividiendo por 15, ya que cada hora equivale a un ángulo de 15° .

Para obtener el ángulo horario:

$$\omega = \frac{360}{24} * TST$$

Altura (h) y ángulo cenital (θ_z): Es necesario conocer la latitud del lugar (φ), como también el ángulo horario y la declinación anteriormente calculados. Este resultado es complementario al ángulo cenital, el cual se forma entre el Sol y la vertical.

$$0^\circ \leq h < 90^\circ$$

$$\begin{aligned} \sin h &= \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega \\ \cos \theta_z &= \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega \end{aligned}$$

Angulo acimutal (Az): Dirección desde la cual proviene la luz del Sol. Se encuentra en función del ángulo cenital, la declinación y el ángulo horario. El signo positivo corresponde para $\omega > 0$.

$$0^\circ \leq Az < 360^\circ$$

$$Az = \pm(\arccos \frac{\sin \varphi \cos \theta_z - \sin \delta}{\cos \varphi \sin \theta_z})$$

El valor de 0° se corresponde con la dirección del Norte geográfico, la del Este a 90° , la del Sur con 180° , y la del Oeste con 270° , es decir que el ángulo aumenta en el sentido de las agujas del reloj.

Aplicando las ecuaciones de geometría solar anteriormente explicadas, se han podido desarrollar dos algoritmos en lenguaje Matlab (Matlab r2015a). El primer algoritmo denominado en este estudio con el nombre “Algoritmo I” es capaz de construir el arco diurno, es decir que puede representar la altura solar y su acimut para cada hora del día, para cualquier día del año, en cualquier punto de la superficie terrestre. El segundo algoritmo (denominado “Algoritmo II”) por su parte, es capaz de calcular el vector solar a partir de datos de latitud, longitud, fecha y hora, esto significa que puede determinar la posición del Sol en tiempo real.

Mediante simulación de los algoritmos desarrollados, se realizó una evaluación para días del año donde ocurren los cambios de estaciones, referidos a la posición del edificio de ingeniería de la FaCENA. En las cuatro estaciones, la Tierra ocupa cuatro posiciones específicas en la órbita elíptica. Estas cuatro posiciones reciben el nombre de solsticios (21 de junio y 21 de diciembre) y equinoccios (20 de marzo y 22 de septiembre). En los solsticios el eje de rotación terrestre está inclinado $\pm 23,5^\circ$ del eje de la elíptica, alcanzando un máximo en verano y un mínimo en invierno, mientras que en los equinoccios el ángulo que forman estos ejes es nulo, por lo tanto, los rayos del Sol caen perpendicularmente sobre el eje ecuatorial.

Se obtuvieron los arcos diurnos para estos días característicos, y se calculó un vector solar promedio de estos meses (marzo, junio, septiembre y diciembre), es decir se obtuvo la componente cenital y acimutal a lo largo del día promedio mensual. Luego de comprobar la precisión de los algoritmos a partir de la información satelital que proporciona la NASA, se procedió a investigar cual es la variación horaria del vector solar en los días en el cual ocurren los cambios de estaciones. Para ello se dividió la jornada en tres períodos, y se determinó cual sería la menor resolución mecánica que el seguidor solar debería tener para su correcto funcionamiento.

RESULTADOS

Se presentan en primer lugar los resultados obtenidos por simulación del Algoritmo I y en segundo lugar los obtenidos a partir del Algoritmo II.

Algoritmo I: Arco Diurno

Las figuras 2 a 5 presentan los arcos diurnos obtenidos para los solsticios y equinoccios referidos a las coordenadas del edificio de ingeniería de la FaCENA, ubicado en el Campus Deodoro Roca ($-27,465^\circ$; $-58,784^\circ$).

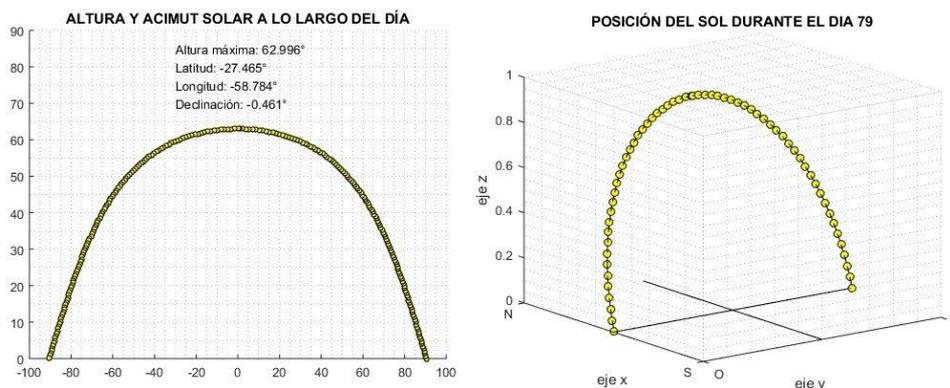


Figura 2. Equinoccio de Otoño, arco diurno del día 20/03

En la *Figura 2* se observa el arco diurno del primer equinoccio del año que ocurre en el día 20 del mes de marzo. La altura solar máxima obtenida es de 62.99° , mientras que la declinación arrojó un valor de -0.46° . Respecto al ángulo acimutal se observa que, para este día particular, la variación de la posición del Sol es de alrededor de 180° . Dicha variación se presenta con mayor detalle en el Algoritmo II.

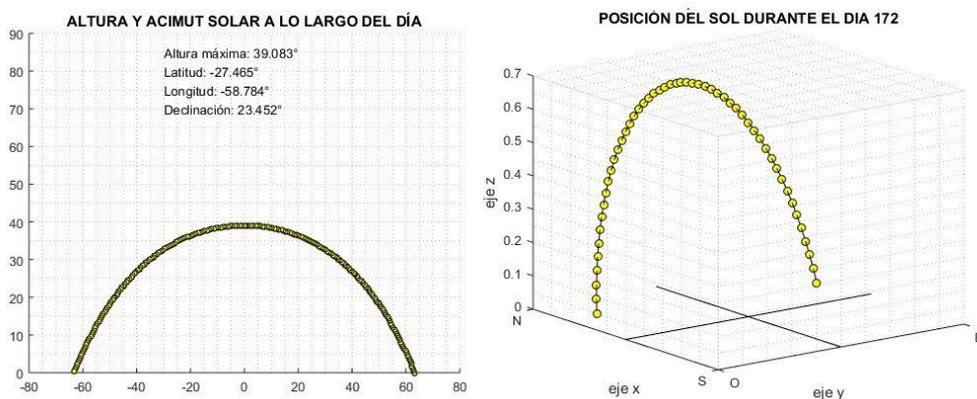


Figura 3. Solsticio de Invierno, arco diurno del día 21/06.

Las gráficas presentes en la *Figura 3*, indican el arco diurno del primer solsticio del año que transcurre el día 21 de junio. Como era de esperarse en estas latitudes para esta época del año, la altura solar máxima disminuye, mientras que la declinación aumenta, esto se ve reflejado en los valores obtenidos, $39,08^\circ$ y $23,45^\circ$ respectivamente. Se observa también que el ángulo azimutal es menor a 180° , esto quiere decir que el vector solar se encontrará en el amanecer y en el ocaso, por delante del punto de observación.

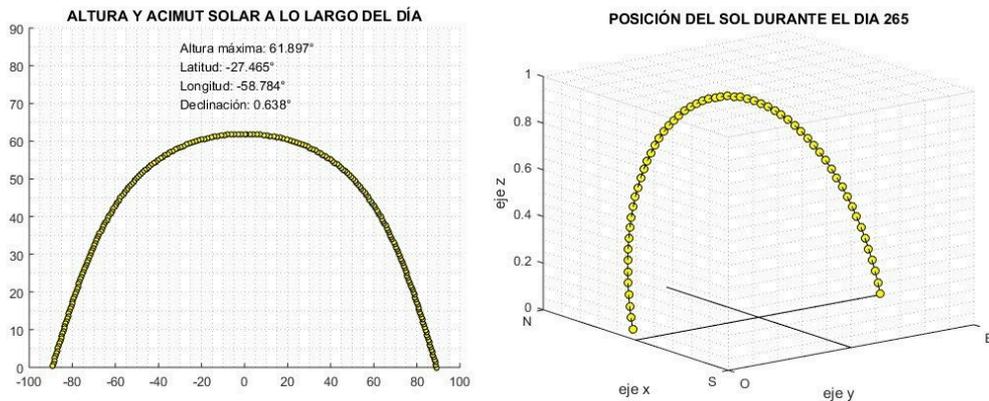


Figura 4. . Equinoccio de Primavera, arco diurno del día 22/09.

La *Figura 4* indica los resultados del arco diurno del segundo equinoccio del año, que transcurre el día 22 de septiembre. Se observa que nuevamente la declinación alcanza un valor cercano a cero, 0.63° según el algoritmo, y que tanto la altura solar como el acimut aumentan. Para esta fecha, la altura máxima calculada es de $61,89^\circ$, y la variación acimutal es aproximadamente 180° .

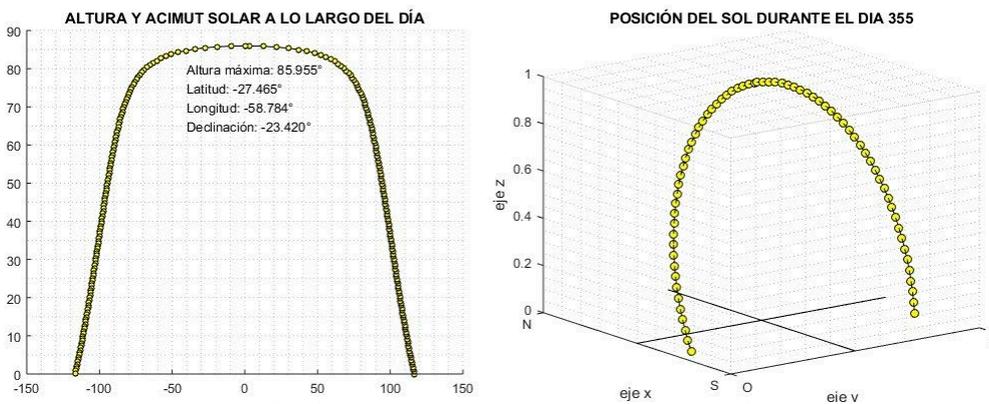


Figura 5. . Solsticio de Verano, arco diurno del día 21/12.

En la *Figura 5*, correspondiente al solsticio de verano, que se presenta el 12 de diciembre de cada año, se expone el aumento de la altura solar máxima, donde el algoritmo obtiene un valor de $85,95^\circ$. Se puede manifestar que, para medir correctamente la componente normal de irradiancia solar, el plano de incidencia del sensor estará casi paralelo al plano del punto de observación terrestre. Como era de esperarse la declinación alcanza un mínimo cuyo valor calculado es de $23,42^\circ$. Otro resultado importante que se obtiene en el algoritmo es que el vector solar, en el amanecer como en el ocaso, estará por detrás del punto de observación, esto ocurre debido a que el ángulo azimutal varía con un ángulo mayor a los 180° .

Algoritmo II: Posición del Sol en tiempo real

Introduciendo datos de latitud, longitud, fecha y hora, este algoritmo es capaz de obtener la posición del Sol en tiempo real, calculando el vector solar cuyas componentes son el ángulo acimutal y la altura solar. A continuación, se presenta una tabla que expone valores promedios de altura solar, ángulo acimutal y mediodía solar, calculados para los meses de los respectivos solsticios y equinoccios, donde los datos de posición pertenecen también a los del edificio de ingeniería (-27,465°; -58,784°).

Lat -27.465		Ángulo Acimutal promedio en grados				Altura Solar promedio en grados			
Lon -58.784		Mar	Jun	Sep	Dic	Mar	Jun	Sep	Dic
GMT	00:00:00	-	-	-	-	-	-	-	-
	01:00:00	-	-	-	-	-	-	-	-
	02:00:00	-	-	-	-	-	-	-	-
	03:00:00	-	-	-	-	-	-	-	-
	04:00:00	-	-	-	-	-	-	-	-
	05:00:00	-	-	-	-	-	-	-	-
	06:00:00	-	-	-	-	-	-	-	-
	07:00:00	-	-	-	-	-	-	-	-
	08:00:00	-	-	-	-	-	-	-	-
	09:00:00	-	-	-	115,76	-	-	-	0,505
	10:00:00	-	-	86,07	109,41	-	-	0,73	12,79
	11:00:00	85,33	62,13	78,90	103,78	13,28	2,59	13,91	25,55
	12:00:00	77,67	54,16	70,64	98,45	26,44	13,88	26,76	38,60
	13:00:00	68,19	44,19	60,10	92,82	39,16	23,94	38,86	51,84
	14:00:00	54,86	31,55	45,28	85,56	50,88	32,12	49,48	65,14
	15:00:00	33,94	16,01	23,51	70,18	60,28	37,51	57,08	78,18
	16:00:00	2,93	358,55	355,18	329,05	64,56	39,27	59,29	84,75
	17:00:00	329,97	341,30	328,45	281,64	61,30	36,99	55,06	73,17
	18:00:00	307,58	326,28	309,21	271,24	52,43	31,11	46,23	59,95
	19:00:00	293,43	314,17	296,08	264,89	40,93	22,56	35,00	46,65
20:00:00	283,55	304,59	286,46	259,47	28,31	12,22	22,60	33,48	
21:00:00	275,71	296,87	278,68	254,08	15,19	0,73	9,61	20,52	
22:00:00	268,69	-	-	248,25	1,90	-	-	7,93	
23:00:00	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mediodía Solar en horas (GMT)		16:04:19	15:55:06	15:50:08	15:48:16				

Tabla 1. Resultados de las ecuaciones de geometría solar aplicadas por el algoritmo II.

Los valores promedios obtenidos en la *tabla I* fueron contrastados con la información promedio mensual que brinda la NASA (NASA, <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>), cuya base de datos es el período de tiempo comprendido entre 1982-2005 (*tabla II*). Los valores en ambas tablas presentan una considerable similitud pudiendo validarse de esta manera los algoritmos desarrollados para su empleo en un sistema de control de un seguidor solar.

Lat -27.465 Lon -58.784	Ángulo Acimutal Promedio en grados				Altura Solar Promedio en grados			
	Mar	Jun	Sep	Dec	Mar	Jun	Sep	Dec
0000 GMT	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
0100 GMT	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
0200 GMT	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
0300 GMT	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
0400 GMT	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
0500 GMT	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
0600 GMT	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
0700 GMT	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
0800 GMT	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
0900 GMT	n/a	n/a	n/a	115	n/a	n/a	n/a	0.60
1000 GMT	n/a	n/a	86.0	109	n/a	n/a	0.62	12.9
1100 GMT	85.1	62.1	78.9	103	13.2	2.81	13.8	25.6
1200 GMT	77.4	54.1	70.7	98.3	26.4	14.1	26.6	38.7
1300 GMT	67.9	44.1	60.1	92.6	39.1	24.1	38.7	51.9
1400 GMT	54.5	31.5	45.4	85.3	50.8	32.3	49.4	65.2
1500 GMT	33.5	15.9	23.6	69.6	60.1	37.7	57.0	78.2
1600 GMT	2.25	358	355	328	64.3	39.4	59.3	84.6
1700 GMT	329	341	328	281	61.0	37.0	55.1	73.0
1800 GMT	307	326	309	271	52.1	31.0	46.3	59.8
1900 GMT	293	313	296	264	40.6	22.5	35.1	46.5
2000 GMT	283	304	286	259	28.0	12.1	22.7	33.3
2100 GMT	275	296	278	254	14.9	0.69	9.73	20.4
2200 GMT	268	n/a	n/a	248	1.63	n/a	n/a	7.83
2300 GMT	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Mediodía Solar	1604 GMT	1555 GMT	1551 GMT	1548 GMT				

Tabla 2. Información satelital que provee la NASA sobre geometría solar.

El Algoritmo II permite realizar una evaluación de la variación del vector solar en tiempo real. A partir del análisis de estos resultados se logró determinar la resolución requerida para que el seguidor solar opere con una exactitud aceptable. Con este parámetro, es posible seleccionar un motor y diseñar su correspondiente caja de reducción para que logre apuntar al sensor de irradiancia directa correctamente en dirección al Sol durante todo el día.

Por otra parte, utilizando el Algoritmo II, se calcularon las componentes del vector solar cada diez minutos, durante tres períodos del día para el edificio de ingeniería ubicado en el Campus Deodoro Roca de la UNNE (*tabla III*). Al igual que para el Algoritmo I, los días seleccionados son aquellos donde ocurren los cambios de estaciones (solsticios y equinoccios), y los tres períodos del día corresponden a las primeras horas, al mediodía, y a las últimas horas.

Evaluando los valores presentados en la *tabla III*, en particular aquellos cuadros que han sido resaltados en color, se puede ver que el ángulo azimutal cambia rápidamente, haciéndolo en horas del mediodía, donde la mayor variación se obtiene en el equinoccio

		Ángulo Acimutal				Altura Solar				
Lat -27.465		20-mar	21-jun	22-sep	21-dic	20-mar	21-jun	22-sep	21-dic	
Lon -58.784										
G M T	1100	83,75	61,99	80,86	104,69	12,80	2,28	15,68	24,75	Primeras horas del día
	1101	83,63	61,87	80,73	104,60	13,02	2,47	15,89	24,96	
	1102	83,51	61,75	80,48	104,52	13,24	2,67	16,33	25,18	
	1103	83,39	61,63	80,48	104,34	13,46	2,86	16,33	25,39	
	1104	83,27	61,51	80,36	104,30	13,68	3,06	16,55	25,61	
	1105	83,15	61,39	80,23	104,25	13,90	3,25	16,76	25,82	
	1106	83,02	61,27	80,10	104,16	14,12	3,45	16,98	26,04	
	1107	82,90	61,15	79,98	104,07	14,34	3,64	17,20	26,25	
	1108	82,78	61,03	79,84	103,98	14,56	3,84	17,42	26,47	
	1109	82,66	60,90	79,72	103,89	14,78	4,03	17,64	26,68	
	1110	82,53	60,78	79,60	103,81	15,01	4,23	17,86	26,90	
	1555	4,49	0,39	356,13	352,91	62,92	39,08	61,84	85,92	Mediodía
	1556	3,93	0,09	355,61	349,73	62,94	39,08	61,83	85,89	
	1557	3,38	359,80	355,08	346,61	62,96	39,08	61,81	85,85	
	1558	2,83	359,50	354,55	343,57	62,97	39,08	61,79	85,79	
	1559	2,28	359,20	354,02	340,61	62,98	39,08	61,77	85,72	
	1600	1,73	358,91	353,50	337,75	62,99	39,07	61,74	85,64	
	1601	1,18	358,61	352,97	334,99	62,99	39,07	61,72	85,55	
	1602	0,63	358,32	352,45	332,35	62,99	39,06	61,69	85,45	
	1603	0,08	358,02	351,93	329,82	62,99	39,06	61,66	85,35	
1604	359,53	357,73	351,40	327,40	62,99	39,05	61,63	85,23		
1605	358,98	357,43	327,33	325,11	62,99	39,04	61,59	85,11		

2030	280,80	300,81	279,82	256,69	20,76	6,65	16,86	28,11	Últimas horas del día
2031	280,67	300,68	279,70	256,60	20,54	6,46	16,64	27,89	
2032	280,54	300,55	279,57	256,51	20,32	6,27	16,42	27,68	
2033	280,41	300,42	279,44	256,43	20,11	6,08	16,20	27,46	
2034	280,28	300,30	279,32	256,34	19,89	5,89	15,98	27,25	
2035	280,15	300,17	279,19	256,25	19,67	5,69	15,76	27,03	
2036	280,02	300,04	279,07	256,16	19,45	5,50	15,54	26,81	
2037	279,89	299,92	278,94	256,07	19,23	5,31	15,32	26,60	
2038	279,76	299,79	278,82	255,98	19,01	5,12	15,10	26,38	
2039	279,63	299,67	278,69	255,89	18,90	4,92	14,89	26,70	
2040	279,50	299,54	278,57	255,81	18,58	4,73	14,67	25,95	

Tabla 3. Variación del ángulo acimutal y altura solar cada 10 minutos.

del 20 de marzo, y es de 1° en solo 3 minutos. Por el contrario, la altura solar es la que sufre menor variación al mediodía, donde tardaría más de 10 minutos en producirse una modificación de 1° . Para las primeras y las últimas horas de la jornada, se invierten las velocidades en los cambios angulares. Ahora el ángulo azimutal demora 8 minutos, y la altura solar tan solo 5 minutos en producir una variación de 1° .

Estos resultados indican, que el mecanismo del seguidor debe ser capaz de proporcionar movimientos de por lo menos $0,1^\circ$ por minuto. El dispositivo actualmente en desarrollo cuenta con dos motores paso a paso, uno para cada eje respectivamente. Estos motores por cada paso recorren $1,8^\circ$ pero asociados a cajas de reducción diseñadas con relaciones de reducción de 25:1 para el ángulo cenital y de 12,5:1 para el ángulo azimutal, sumado a la posibilidad de realizar micro-pasos a través controladores comerciales, se alcanzan las resoluciones adecuadas para un correcto posicionamiento del dispositivo.

CONCLUSIONES

Este trabajo presento una breve reseña sobre geometría solar y las ecuaciones matemáticas que la modelan. Las mismas fueron aplicadas para el desarrollo de dos algoritmos en lenguaje Matlab, uno que permite trazar el arco diurno de un día cualquiera del año, para cualquier punto de la superficie terrestre, y otro que indica la posición del Sol en tiempo real. Los resultados obtenidos han sido contrastados con datos promedios mensuales que provee sobre geometría solar la NASA de forma gratuita. Dada la similitud entre estos datos con los obtenidos a partir de las ecuaciones empleadas, se concluye que los algoritmos desarrollados son lo suficientemente precisos para ser utilizados en el sistema de control de un seguidor solar.

Para poder determinar el sistema mecánico adecuado para el seguidor, se estudió la variación de las componentes del vector solar. Con el fin de diseñar cada eje del dispositivo se observó la mínima modificación angular que sufre tanto la componente cenital como

acimutal. Se comprobó que la posición del Sol varía de manera distinta dependiendo de la fecha y hora.

A partir del análisis de estos resultados se está desarrollando el seguidor solar a dos ejes, empleando dos motores paso a paso asociados a cajas con relaciones de reducción de 25:1 para el ángulo cenital y de 12,5:1 para el ángulo azimutal. El sistema requiere únicamente de los datos de posición, fecha y hora que provee un módulo electrónico GPS, y donde las acciones de control son ejecutadas por un microcontrolador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- Bilbao J., De Miguel A. Serie Ponencias. “Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica”. Tomo I y II. Ciemat. 1992.
- 2- Grossi Gallegos H., Righini R. “Atlas de energía solar de la República Argentina”. Universidad Nacional de Luján. 2007
- 3- Mousazadeh H. Keyhani A. “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13. 2009
- 4- NASA. Atmospheric Science Data Center. Surface meteorology and Solar Energy – Location. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>
- 5- Prinsloo G., Dibson R. “Solar Tracking. High precision solar position algorithms, programs, software and source-code for computing the solar vector, solar coordinates and sun angles in Microprocessor, PLC, Arduino, PIC and PC-based sun tracking devices or dynamic sun following hardware”. 2015.
- 6- Reda I., Afshin A. “Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications”. National Renewable Energy Laboratory. 2008.