

Cálculo y análisis de la máxima eficiencia anual de los seguidores solares¹

Calculation and analysis of the maximum annual efficiency of solar trackers

Calculo e análise do máximo eficiência anual dos seguidores solares

C. R. Batista y R. I. Urquiza

Recibido: junio 21 de 2017 - Aceptado: junio 30 de 2018

Resumen— En este trabajo se propone una metodología estándar para el cálculo de la eficiencia de los seguidores solares para cualquier latitud geográfica. En la revisión bibliográfica hubo una selección de los artículos afines para analizar la información, a partir de lo cual se identificó una dispersión de los resultados reportados respecto al valor medio. Se desarrolló un algoritmo para calcular la eficiencia energética máxima teórica, basado en una revisión científica del concepto de eficiencia. El algoritmo se programó y se corrió de acuerdo con la latitud de los reportes, obteniendo valores máximos de eficiencia teórica para cada una de las latitudes reportadas, con diferencias significativas respecto a los datos presentados por los autores. En los artículos estudiados no se identifican metodologías claras para el cálculo de la eficiencia de los seguidores solares. La metodología propuesta puede servir de referencia, ya que la eficiencia real no puede ser mayor que la teórica.

Palabras clave— Eficiencia seguidor solar, máxima eficiencia teórica, metodología cálculo, soporte móvil.

Abstract— A standard methodology is proposed in this work to calculate the efficiency of solar trackers for any geographical latitude. A literature review was performed, and related articles were selected. Following an analysis of the information, a dispersion of the reported results with respect to the mean value was identified. An algorithm was developed to calculate theoretical maximum energy efficiency, based on a scientific review of the concept of efficiency. The algorithm was programmed and ran according to the latitude in the reports. Maximum values of theoretical efficiency were obtained for each of the reported latitudes, presenting significant differences regarding the data presented by the authors. No clear methodologies for calculating the efficiency of solar trackers were identified in the articles studied. The proposed methodology be used as a reference, given that the real efficiency cannot be greater than the theoretical.

Keywords— Efficiency of solar tracker, maximum theoretical efficiency, methodology calculation, mobile support.

¹Producto derivado del proyecto de investigación “Estudio y Rediseño de un Sistema de Calefacción Solar de Agua”, Presentado por el Grupo de Investigación REM, de la Universidad Antonio Nariño.

C.R. Batista, Universidad Antonio Nariño, Tunja, Colombia, email: carlos.batista@uan.edu.co.

R.I. Urquiza, Universidad de Holguín, Holguín, Cuba, e-mail: rurquiza@uho.edu.cu.

Como citar este artículo: Batista, C. R. y Urquiza, R. I. Cálculo y análisis de la máxima eficiencia anual de los seguidores solares, *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, no. 24, pp. 25-31, julio-diciembre, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3812>

Resumo— Neste trabalho propõe-se uma metodologia padrão para o cálculo da eficiência de rastreadores solares para qualquer latitude geográfica. Na revisão bibliográfica, foram selecionados artigos afins, procedeu-se uma análise da informação e identificou-se uma dispersão dos resultados descritos no que respeita ao valor da média. Desenvolveu-se um algoritmo para o cálculo da eficiência energética máxima teórica, com base em uma revisão científica do conceito de eficiência. O algoritmo foi programado e executado de acordo com a latitudes dos registros. Valores máximos de eficiência teórica foram obtidos para cada uma das diversas latitudes reportadas, diferenças significativas foram encontradas em relação aos dados apresentados pelos autores. Nos artigos em apreço, não são identificadas metodologias claras para o cálculo



da eficiência dos rastreadores solares. A metodologia proposta pode servir de referência, uma vez que a eficiência real não pode ser maior do que a eficiência teórica.

Palavras chave— Eficiência seguidor solar, máxima eficiência teórica, metodologia cálculo, soporte móvil.

I. INTRODUCCIÓN

EN la literatura científica aparecen diferentes referencias a los seguidores solares: el seguimiento del Sol es el acto de hacer cambiar la dirección del movimiento de una superficie en correspondencia con el movimiento del astro rey en el cielo, para recolectar la energía solar [1]; los seguidores solares son utilizados para mantener la superficie del colector solar perpendicular al sol y permitir recolectar una mayor cantidad de radiación solar con respecto a una superficie fija [2]; el seguimiento solar es el proceso de la variación del ángulo del panel solar para aumentar la cantidad de energía solar a recolectar [3]; los seguidores solares son dispositivos mecánicos usados para apuntar el panel solar hacia el Sol o directamente a la luz solar por la celda fotovoltaica o el módulo. Pueden ser clasificados en dos tipos: seguidor estándar fotovoltaico o seguidor concentrador fotovoltaico;

estos a su vez pueden ser catalogados según la cantidad de ejes, los tipos de accionadores, su arquitectura, soportes, etc. [4].

El uso de los seguidores solares permite que el aprovechamiento de la energía solar sea una alternativa que posibilita un desarrollo energético sostenible [5]. El diseño conceptual de los seguidores solares se puede apreciar en el trabajo [6], donde se muestra el diseño de prototipo, de *hardware* y algoritmo de control. Además, en [7-9] se describen diferentes tipos de diseño, construcción y funcionamiento de seguidores solares.

En este trabajo, los cálculos se realizan para un seguidor solar estándar, según la clasificación de [4]. En varias fuentes se habla, indistintamente, de eficiencia o ganancia, sin contextualizar qué debe entenderse por tal expresión. En esta investigación se asume que la eficiencia o ganancia de un seguidor solar estándar es la relación entre la cantidad de energía generada en un período por un panel solar que está instalado sobre un soporte móvil, respecto a la cantidad de energía generada por dicha instalación, en el mismo período de tiempo, si estuviera montada sobre un soporte fijo, bajo idénticas condiciones climatológicas, de localidad geográfica e instantes de tiempo.

TABLA I
GANANCIAS REPORTADAS POR DIFERENTES SEGUIDORES SOLARES DISEÑADOS

REF	Título	Año	Ganancia reportada de los seguidores solares [%]	
			Con movimiento en dos ejes	Con movimiento en un eje
[2]	Performance Evaluation of Sun Tracking Photovoltaic Systems in Canada	2012	55.7	50.1
[10]	Design and Development of a Sun Tracking mechanism using the Direct SMA actuation	2004	75.0	-
[11]	Design and development of an educational solar tracking parabolic trough collector system	2013	60.0	
[12]	Design of a novel passive solar tracker	2004	-	23.0
[13]	Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system	2004	-	20.0
[14]	Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker	2011	-	34.6
[15]	Solar Panel Tracker	2010	30-50	-
[16]	Sun tracking system for productivity enhancement of solar still	2008	-	22.0
[17]	Solar tracking: an efficient method of improving solar plant efficiency	2015		23.0
[18]	Theoretical and experimental performance investigation of a two- axis solar tracker under the climatic condition of Denizli, Turkey	2012	64.0	-
[19]	Performance evaluation of a solar tracking PV panel	2012	57.55	-
[20]	Comparison of Efficiencies of Solar Tracker systems with static panel Single- Axis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount	2013	81.68	32.17
[21]	Designing a Dual-Axis Solar Tracking System for increasing efficiency of a Solar Panel	2016	40.0	-
[22]	Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracker	2016	50-60	-

Partiendo de la definición anterior, en la literatura científica se dan diferentes valores de ganancia o eficiencia de los seguidores solares, en muchas ocasiones contradictorios, reportándose ganancias desde un 20% hasta un 81,68%. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los reportes de ganancias de seguidores solares, a partir de la bibliografía consultada.

Al profundizar en esta información, se encontró que los resultados declarados expresan gran dispersión respecto a valores medios, y que las fuentes tampoco mencionan cuáles son los mayores valores posibles.

Por tanto, el objetivo de esta investigación es analizar algunos de los resultados reportados y compararlos con los parámetros que arrojan los cálculos de las máximas ganancias teóricas que se pueden alcanzar en las latitudes donde se realizaron los estudios. Para el estudio se propone una metodología en siete pasos, descrita en la Parte II, y que se aplica a tres casos de estudio, entre los que aparecen reportados en la Tabla 1. Con este fin, fue preciso desarrollar un algoritmo y programarlo en una aplicación informática desarrollada para el caso, por el volumen de cálculos a enfrentar. La metodología se basa en las consideraciones que se exponen en adelante.

Las ganancias máximas teóricas están dadas por la relación entre la máxima irradiación que se podría obtener sobre una superficie móvil que mantuviera su vector normal coincidente con los rayos solares (con ángulo cero de desviación), y la máxima irradiación que se podría obtener sobre una superficie fija con un ángulo de inclinación óptima, para el período de un año. Para los cálculos se toma que la irradiancia media (I_o), en un día despejado, que llega a la superficie de la Tierra es la misma para ambas superficies, ya sea la fija o la móvil, por lo que es una variable controlada que no influye en los resultados y toma un valor de 1kW/m². Los cálculos teóricos de ganancia se realizaron para latitudes específicas y se determinaron respecto a superficies inclinadas y superficies horizontales [23]. Para la realización de los cálculos teóricos generales de esta investigación, se utilizaron expresiones conocidas en la literatura científica [24], [25].

La máxima irradiación en un período de tiempo sobre una superficie con movimiento en los dos ejes (acimutal y polar), que teóricamente mantenga cero grados de desviación entre el vector normal a la superficie y el vector de los rayos solares, se puede calcular por (1):

$$H_{msm} = \int_{t_s}^{t_p} I_0 \cos \theta dt . \quad (1)$$

Como $\cos \theta = 1$, la expresión (1) se transforma en (2):

$$H_{msm} = I_0(t_p - t_s), \quad (2)$$

donde:

H_{msm} - máxima irradiación en un período dado sobre una superficie móvil en kWh/m²;

t_s - hora de salida del Sol;

t_p - hora de puesta del Sol;

I_o - Irradiancia media que se tiene en la superficie terrestre;

se toma como la unidad de medida “un sol” con el valor de 1kW/m².

Sin embargo, con el transcurso de las horas, tanto de un día en particular como de cualquier día en general, el ángulo θ va cambiando, por lo que el cálculo del valor del ángulo en un instante dado se realiza a través de la expresión (3):

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) + \\ & + \cos \delta (\cos \phi \cos \beta \cos \gamma + \\ & + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \sin \beta \sin \gamma \sin \omega) \end{aligned} \quad (3)$$

Aquí:

δ - declinación solar;

ω - ángulo horario solar;

ϕ - latitud;

β - ángulo polar;

γ - ángulo acimutal.

El cálculo de la irradiación que podría llegar a una superficie con movimiento en un solo eje se puede calcular por la expresión (1); sin embargo, debe tenerse en cuenta que para cada día y cada momento del día el coseno del ángulo θ varía. Es decir, para cada instante de tiempo es necesario saber el valor que tienen los ángulos δ , ϕ , β , γ , ω . Según expresiones conocidas en la literatura, dichos ángulos se pueden calcular para cada instante de tiempo. Además, para determinar la irradiación que llega a una superficie móvil de un solo eje es necesario conocer cuál de los dos ejes tendrá movimiento. Si es móvil el eje acimutal, es necesario fijar un valor para el ángulo polar; en caso contrario, si el movimiento es del eje polar, se requiere entonces establecer un valor para el ángulo acimutal.

Para el cálculo de la irradiación, con cualquier combinación de ángulos fijos polar (β) y acimutal (γ), se integra (3) en el intervalo $[-\omega_s; \omega_s]$ y se obtiene la expresión (4):

$$\begin{aligned} H_{(\beta, \gamma)} = & \frac{24}{\pi} \sin \omega_s (\cos \phi \cos \beta \cos \delta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \delta) + \\ & + \frac{24}{\pi} \omega_s (\sin \phi \cos \beta \sin \delta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \sin \delta) \end{aligned} \quad (4)$$

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del análisis de las ganancias reportadas en diferentes trabajos sobre seguidores solares con movimiento en uno o dos ejes, se estableció la siguiente **metodología de cálculo**:

1. Se identifica la latitud del lugar desde donde se realizó el reporte.
2. Para la latitud especificada se calculan los ángulos de posicionamiento anual β y γ de un soporte fijo que recibe la mayor cantidad de irradiación. Para realizar dichos cálculos se desarrolló una aplicación informática con el procedimiento siguiente:
 - a) Para cada combinación de ángulos posibles de γ (entre -90° y 90°) y β (entre 0° y 90°) se calcula la irradiación diaria para cada día del año.
 - b) Para cada combinación de ángulo acimutal y polar se suma la irradiación diaria para el año.

- c) Se procede a buscar la máxima irradiación anual, dada por el acoplamiento de los ángulos acimutales y polares, obteniéndose la mejor combinación.
3. Con la mejor combinación de ángulo acimutal y polar se calcula la máxima irradiación diaria por la expresión (4). Se obtiene el valor anual con la sumatoria de los valores diarios.
4. Con la expresión (2) se halla la máxima irradiación diaria sobre una superficie con movimiento en dos ejes, obteniéndose el valor anual a través de la suma de los valores diarios.
5. Para el cálculo de la máxima irradiación diaria sobre una superficie con movimiento en un solo eje se procede de la forma siguiente:
- a) Si el movimiento del eje es acimutal, se fija como el mejor ángulo polar el calculado en el Paso 2 y se determina el coseno del ángulo θ por la expresión (3), para diferentes instantes de tiempo. La aplicación informática desarrollada permite elegir el intervalo de medición; para los cálculos realizados en este trabajo, el intervalo seleccionado fue de 30 minutos, entre el horario de salida y el horario de puesta del Sol en el día.
- b) Si el movimiento del eje es polar, se fija como el mejor ángulo acimutal el calculado en el Paso 2 y se halla el coseno del ángulo θ por la expresión (3), para diferentes instantes de tiempo.
- c) Se calcula la irradiación para cada intervalo de medición por la expresión (1), la radiación diaria y anual se obtiene sumando las irradiaciones parciales obtenidas en cada intervalo de medición.
6. Con los resultados anuales obtenidos en los puntos 3, 4 y 5 se encuentra el coeficiente de ganancia/eficiencia teórica para una superficie con movimiento en uno o dos ejes (G_{mga}), dado por la expresión (5):

$$G_{mga} = \left(\frac{\sum_{1}^{365} H_{msm}}{\sum_{1}^{365} H_{(\beta,\gamma)}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (5)$$

En la expresión (5):

G_{mga} - máxima ganancia/eficiencia anual en %.

7. El valor obtenido para la máxima ganancia/eficiencia anual se compara con los resultados reportados y se realiza el análisis de si estos últimos se corresponden o no con los valores que pueden ser alcanzados.
- Los **materiales** usados en esta investigación fueron:
- Trabajos que han hecho públicos resultados sobre estudios de eficiencia y diseño de seguidores solares, donde se reportan las ganancias obtenidas.
 - Aplicación informática desarrollada por los autores.

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los casos de estudio A, B y C, consecuencias del análisis detallado de algunos reportes de ganancia de seguidores solares diseñados, con la aplicación

de la metodología desarrollada para encontrar la máxima ganancia/eficiencia teórica posible de un seguidor solar.

- A) En [10], en la página 1 al final del primer párrafo, se indica que se pretende alcanzar con el desarrollo del seguidor con movimiento en dos ejes una eficiencia de un 75%. No se especifican los ensayos realizados, ni la latitud para la cual fue propuesto el diseño.

Con la información disponible se procedió a aplicar la metodología de cálculo propuesta en la Parte II, con el objetivo de comprobar si es posible obtener tales ganancias en un año de trabajo del seguidor solar.

1. Para el cálculo se asumió como latitud la correspondiente a la localidad donde se realizó el trabajo, es decir, el Indian Institute of Technology Madras, situado a 13,087 grados de latitud Norte y 80,27 grados de longitud Este.
2. Se buscaron los mejores ángulos de posicionamiento fijo de un soporte, resultando $\beta = 13,0$; $\gamma = 0,0$.
3. Se calculó la irradiación máxima del año 2004 para el posicionamiento fijo con los ángulos del Punto 2, obteniéndose $H_{(\beta=13,087; \gamma=0,0)} = 2673,56$ kWh/m².
4. Se calculó la irradiación máxima del año 2004 para el posicionamiento fijo horizontal ($\beta=0,0$; $\gamma=0,0$), siendo el valor de $H_{(\beta=0,0; \gamma=0,0)} = 2604,118$ kWh/m².
5. Se calculó la irradiación máxima del año 2004 para una superficie móvil con dos ejes, obteniéndose el valor de $H_{msm} = 4215,768$ kWh/m².
6. Se calculó la máxima ganancia/eficiencia teórica que se puede alcanzar con un soporte móvil de dos ejes para la latitud de estudio, respecto a una superficie fija con la mejor inclinación; siendo el valor calculado de $G_{máx} = 0,58$.
7. Se comparó el valor de máxima ganancia teórica obtenido (58%) con el valor reportado (75%), existiendo una diferencia de +17%. El signo “+” en esta comparación indica que la ganancia publicada en [10] supera, en la magnitud indicada, la ganancia máxima teórica.
8. Se calculó la máxima ganancia/eficiencia teórica que se puede alcanzar con un soporte móvil de dos ejes para la latitud de estudio respecto a una superficie horizontal, siendo el valor calculado de $G_{máx} = 0,62$.
9. Se comparó el valor de máxima ganancia obtenido (62%) con el valor reportado (75%), existiendo una diferencia de un +13%, es decir, el valor informado para este caso también es mayor que la máxima eficiencia teórica.

- B) En las conclusiones de [20] se plantea textualmente: “El modelo propuesto de un seguidor solar de dos ejes, es capaz de seguir el sol a través de todo el año. El seguidor de doble eje facilita una mayor potencia de salida cuando es comparado con un seguidor de un solo eje y con un panel fijo. De acuerdo con las mediciones realizadas se encontró que la eficiencia del seguidor de doble eje es de 81,68% con respecto al panel fijo, mientras que la eficiencia del seguidor solar en un solo eje es solamente 32,17 mayor que la del panel fijo”.

Con tal información se aplicó la metodología de cálculo, para comprobar si se pueden obtener ganancias de 81,68% para un seguidor solar de doble eje, y 32,7% para un seguidor de un solo eje.

1. Para el cálculo se asumió como latitud la de la localidad donde se realizó el trabajo, es decir, la VIT University, en Vellore, con 12,91 grados de latitud Norte y 79,15 grados de longitud Este.
 2. Se determinaron los ángulos óptimos de posicionamiento del soporte fijo: $\beta = 12,91$; $\gamma = 0,0$.
 3. Se calculó la irradiación máxima del año 2013, para el posicionamiento fijo con los ángulos especificados en el Punto 2, obteniéndose para este caso un valor de $H_{(\beta=12,91; \gamma=0,0)} = 2666,176 \text{ kWh/m}^2$.
 4. Se calculó la irradiación máxima del año 2013, para el posicionamiento fijo horizontal, llegándose al valor de $H_{(\beta=0,0; \gamma=0,0)} = 2599,168 \text{ kWh/m}^2$.
 5. Se calculó la irradiación máxima del año 2013, para una superficie móvil con dos ejes, obteniéndose el valor de $H_{msm} = 4206,498 \text{ kWh/m}^2$.
 6. Se calculó la irradiación máxima del año 2013, para una superficie móvil con un eje de movimiento acimutal, obteniéndose $H_{msm} = 3152,54 \text{ kWh/m}^2$.
 7. Se calculó la irradiación máxima del año 2013, para una superficie móvil con un eje de movimiento polar, obteniéndose el valor de $H_{msm} = 2362,87 \text{ kWh/m}^2$.
 8. Se calculó la máxima ganancia/eficiencia teórica que se puede alcanzar con un soporte móvil de dos ejes para la latitud de estudio, respecto a la superficie inclinada, siendo el valor calculado de $G_{m\acute{a}x} = 0,58$.
 9. Se calculó la máxima ganancia teórica que se puede lograr con un soporte móvil de dos ejes para la latitud de estudio, respecto a una superficie horizontal, siendo el valor calculado de $G_{m\acute{a}x} = 0,62$.
 10. Se calculó la máxima eficiencia teórica que se puede alcanzar con un soporte móvil de un eje acimutal para la latitud de estudio, respecto a la superficie inclinada, siendo el valor de $G_{m\acute{a}x} = 0,18$.
 11. Se calculó la máxima ganancia teórica que se puede alcanzar con un soporte móvil de un eje acimutal para la latitud de estudio, respecto a una superficie horizontal, siendo el valor calculado de $G_{m\acute{a}x} = 0,22$.
 12. Se comparó el valor de ganancia máxima obtenido con un seguidor solar de dos ejes (58%) con el valor reportado (81,68%), existiendo una diferencia de +23,68%.
 13. Se comparó el valor de ganancia máxima obtenido con un seguidor solar de un eje acimutal (18%) con el valor reportado (32,17%), para una diferencia de +14,17%.
- C) En la introducción de [2] se plantea: “El análisis fue realizado para las condiciones climatológicas prevalecientes en Montreal, Canada. El análisis anual muestra un incremento de la radiación solar obtenido por un sistema inclinado, un sistema móvil acimutal y un sistema con movimiento dual comparado con un sistema horizontal. Los incrementos anuales son 16,8%, 50,1% y 55,7% respectivamente”.

Con esa información se aplicó la metodología propuesta.

1. Para el cálculo se asumió la latitud de la localidad donde se realizó el trabajo, es decir, de la ciudad de Montreal con 45,50 grados de latitud Norte y 73,58 grados de longitud Oeste.
2. Se calcularon los ángulos óptimos de posicionamiento de un soporte fijo: $\beta = 45,5$; $\gamma = 0,0$.
3. Se calculó la irradiación máxima del año 2012, para el posicionamiento fijo horizontal, siendo un valor de $H_{(\beta=0,0; \gamma=0,0)} = 1792,828 \text{ kWh/m}^2$.
4. Se calculó la irradiación máxima del año 2012, para el posicionamiento fijo con los ángulos especificados en el punto 2, siendo $H_{(\beta=45,5; \gamma=0,0)} = 2557,374 \text{ kWh/m}^2$.
5. Se calculó la irradiación máxima del año 2012, para una superficie móvil con dos ejes, obteniéndose el valor de $H_{msm} = 3620,557 \text{ kWh/m}^2$.
6. Se calculó la irradiación máxima del año 2012, para una superficie móvil con un eje de movimiento acimutal, obteniéndose $H_{msm} = 3381,93 \text{ kWh/m}^2$.
7. Se calculó la máxima ganancia/eficiencia teórica a lograr con un soporte móvil de dos ejes respecto a la superficie horizontal, resultando $G_{m\acute{a}x} = 1,02$. El valor supera la unidad, lo que debe entenderse en el sentido de que la superficie horizontal no es la mejor opción.
8. Se calculó la máxima ganancia teórica que se puede alcanzar con un soporte móvil de dos ejes respecto a la superficie inclinada con los mejores ángulos de posicionamiento ($\beta = 45,5$; $\gamma = 0,0$), para un valor de $G_{m\acute{a}x} = 0,42$.
9. Se calculó la máxima ganancia/eficiencia teórica que se puede alcanzar con un soporte móvil de eje acimutal respecto a la superficie horizontal ($\beta = 45,5$; $\gamma = 0,0$), obteniéndose $G_{m\acute{a}x} = 0,88$.
10. Se calculó la máxima ganancia teórica que se puede obtener con un soporte móvil de eje acimutal con respecto a la superficie inclinada con los mejores ángulos de posicionamiento ($\beta = 45,5$; $\gamma = 0,0$), siendo el valor de $G_{m\acute{a}x} = 0,32$.
11. Se calculó la máxima eficiencia teórica a ser lograda con un soporte fijo inclinado ($\beta = 45,5$; $\gamma = 0,0$) respecto a una superficie horizontal ($\beta = 0,0$; $\gamma = 0,0$), siendo el valor obtenido para $G_{m\acute{a}x} = 0,42$.
12. Se comparó el valor de máxima ganancia obtenido por una superficie móvil de dos ejes respecto a la superficie horizontal (102,00%) con el valor reportado (55,7%), mostrándose una diferencia entre ambos de -46,3%. El signo “-” indica que la ganancia reportada en [2] para este caso está por debajo de la máxima ganancia teórica calculada.
13. Se comparó el valor de ganancia máxima obtenido respecto a la superficie horizontal por un seguidor solar en un eje acimutal (88,00%), con el valor reportado (50,1%), existiendo una diferencia también negativa, de magnitud 37,9%.

IV. DISCUSIÓN

Al valorar los resultados del Caso de estudio A y contrastarlos con los máximos valores de ganancia/eficiencia

que es posible obtener, se observa que en ninguna de las dos variantes presentadas (es decir, ni respecto a la superficie inclinada ni a la superficie horizontal) es posible llegar a una eficiencia del 75% con un seguidor solar de dos ejes para la latitud especificada.

Los parámetros publicados en el Caso de estudio B, analizados contra los máximos valores posibles de ganancia/eficiencia, tienen similares características a los del Caso A. En ninguna de las comparaciones, ni respecto a la superficie inclinada ni a la superficie horizontal, es posible obtener una eficiencia del 81,68% con un seguidor solar de dos ejes para la latitud especificada; ni de 32,17% para un seguidor de un solo eje.

Los resultados declarados en el Caso de estudio C, comparados con los máximos posibles valores por la superficie inclinada, el seguidor acimutal y el seguidor de dos ejes, respecto a la superficie horizontal, se consideran totalmente posibles. Con ese diseño de seguidor solar existen, por tanto, reservas para alcanzar mayores números que los reportados, que fueron de 16,8%, 50,1% y 55,7%, respectivamente.

Al contrastar los resultados que arrojan los cálculos de máxima ganancia/eficiencia teórica realizados en la presente investigación, con los declarados por esas dos fuentes consultadas, se observa que la información publicada sobre la ganancia obtenida con los seguidores solares en los casos A y B muestra cifras muy superiores a la posible ganancia máxima a obtener, ya sea respecto a un soporte fijo inclinado o a uno horizontal. Ello podría estar dado por diferentes razones, entre ellas, que las mediciones se hicieran para determinados días y no para todo un año; o que los controles no hayan sido paralelos, es decir, que las mediciones de los soportes fijos y móviles no tuvieran lugar bajo las mismas condiciones.

En cambio, en el Caso C, las ganancias se reportan respecto a un soporte horizontal y en los tres ensayos sus valores se encuentran por debajo de las posibles ganancias teóricas máximas para las condiciones controladas. Ello muestra las potencialidades de que aún disponen las tecnologías ensayadas.

A modo de resumen, se presentan en la Tabla 2 los resultados para los tres casos estudiados.

V. CONCLUSIONES

Los reportes de ganancia de los seguidores solares no están normalizados, algo que cabía esperar, ya que la propia definición de ganancia o eficiencia no es clara. La relación es siempre contra un soporte fijo, sin especificar si el mismo está inclinado con los mejores ángulos posibles, o si es horizontal. Por lo cual, no es de sorprender que existan grandes diferencias en las ganancias publicadas en la literatura sobre esta temática, como fue claramente establecido al analizar los tres casos de estudio presentados.

En la revisión bibliográfica no se identificaron metodologías que explicaran cómo habían sido realizados los estudios que arrojaron los parámetros logrados. La metodología de cálculo desarrollada en la presente investigación está basada en los referentes teóricos presentados en la Introducción, por tanto, puede considerarse estándar por sus características, y permite determinar, para cualquier latitud del planeta, cuál es la ganancia/eficiencia máxima que se puede conseguir con un seguidor solar respecto a cualquier ángulo de posición de un soporte. Por consiguiente, es una metodología que puede servir de referencia para los diseñadores. Es de notar que la máxima eficiencia real de un seguidor solar no podrá ser nunca superior a la mayor teórica posible, ya que la precisión de seguimiento y los cambios climáticos repentinos modifican sustancialmente la eficiencia de un seguidor solar.

REFERENCIAS

- [1] Kanyarusoke, K., Gryzgoridis, J. and Oliver, G., "Are solar tracking technologies feasible for domestic applications in rural tropical Africa?", *J. of Energy in Southern Afric*, vol. 26, no. 1, pp. 86–95, 2015.
- [2] Mehrtash, M. et al., "Performance Evaluation of Sun Tracking Photovoltaic Systems in Canada", in *20th Annual Int. Conference on Mechanical Engineering ISME2012*, School of Mech. Eng., Shiraz University, Shiraz, Iran. Performance pp. 18–21, 2012.
- [3] Kusekar, S., "Tracking of Solar Panel by Hydraulic System", *Int. J. of Informative & Futuristic Research (IJIFR)*, vol. 2, no. 8, pp. 2856–2881, 2015.
- [4] Specifications of solar trackers used for photovoltaic systems, IEC-62108 Int. Electrotechnical Commission, pp. 3–26, 2007 [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=ja&uact=8&ved=0ahUKEwiWSP_K79PSAhVI9mMKHW3nAgwQFgg5MAA&url=http%3A%2F%2Fstandardsproposals.bsigroup.com%2Fhome%2Fgetpdf%2F534&usq=AFQjCNGZL0ud2i0rCcUPCf7gGRh-

TABLA II
RESUMEN DE LOS VALORES COMPARATIVOS DE GANANCIA DE LOS SEGUIDORES SOLARES

Caso de estudio	Seguidor de dos ejes			Seguidor de un eje			Superficie inclinada	
	Ganancia reportada [%]	Ganancia máxima posible calculada		Ganancia reportada [%]	Ganancia máxima posible calculada		Ganancia reportada [%]	Ganancia máxima posible calculada [%]
		Respecto superficie inclinada óptima [%]	Respecto superficie horizontal [%]		Respecto superficie inclinada óptima [%]	Respecto superficie horizontal [%]		
A	75,0	58,0	62,0	-	-	-	-	-
B	81,7	58,0	62,0	32,7	18,0	22,0	-	-
C	55,7	42,0	102,0	50,1	32,0	88,0	16,8	42,0

- qXzENSw&sig2=ZDm9QDILMIOQqDcpcnpK_Q [Consulted: 02-15-2017].
- [5] Valcárcel, J. and González, H., "Application of Technological Systems of Solar Energy Conversion", *Entre Ciencia e Ingeniería*, Año 5. No. 9, pp. 9 – 17, 2011
 - [6] Rumbayan, M. and Dwisnanto, M., "A Concept of Solar Tracker System Design", *Int. J. of Engineering Sciences & Research Technology*, vol 6. (11), November 2017, pp. 440-448 DOI: 10.5281/zenodo.1066204, 2017.
 - [7] Rizman, Z. et al., "Design a Simple Solar Tracker for Hybrid Power Supply", *J. of Fundamental and Applied Sciences*, 10 (2S), pp. 333-346, February 2018.
 - [8] Eberochi, R. and Nyebuchi, H., "Design and Implementation of an Off-Grid Solar Tracker Control System using Proteus Version 8.1", *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, vol. 08, Issue 4, pp. 04-12, April 2018.
 - [9] Morón, C. et al., "New Prototype of Photovoltaic Solar Tracker Based on Arduino", *Energies (MDPI)*, vol. 10, 2017, pp.1-13; doi:10.3390/en10091298, 2017.
 - [10] Ganesh, J. et al., "Design and Development of a Sun Tracking mechanism using the Direct SMA actuation", Dept. of Mech. Eng., Texas A&M University, College Station, TX, USA, 2011 [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/277371404_Design_and_Development_of_a_Sun_Tracking_Mechanism_Using_the_Direct_SMA_Actuation [Consulted: 02-03-2017].
 - [11] Odeh, S. and Abu-Mulaweh, H., "Design and development of an educational solar tracking parabolic trough collector system", *Global J. of Eng. Educ.*, vol. 15, no. 1, pp. 21–27, 2013.
 - [12] Clifford, M. and Eastwood, D., "Design of a novel passive solar tracker", *Solar Energy*, vol. 77, pp. 269–280, 2004.
 - [13] Al-Mohamad, A., "Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system", *Appl. Energy*, vol. 79, pp. 345–354, 2004.
 - [14] Huang, B. J., Ding, W. L. and Huang, Y. C., "Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker". *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 1935–1944, 2011.
 - [15] Hsing, A., "Solar Panel Tracker", Elect. Eng. Dept., California Polytechnic State University San Luis Obispo, 2010. [Online]. Available: <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1060&context=eesp> [Consulted 01-10-2017].
 - [16] Absallah, S. and Bradan, O., "Sun tracking system for productivity enhancement of solar still", *Sci. Direct Desalination*, vol. 220, pp. 669–676, 2008.
 - [17] Garg, A. et al., "Solar Tracking: An Efficient Method Of Improving Solar Plant Efficiency", *Int. J. of Elect. and Electron. Engineers*, vol. 7, no. 1, pp. 199–203, 2015.
 - [18] Kivrak, S., Gunduzalp, M. and Dincer, F. "Theoretical and experimental performance investigation of a two- axis solar tracker under the climatic condition of Denizli", Turkey", *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, no. 2, pp. 332–336, 2012.
 - [19] Tudorache, T., Oancea, C. and Kreindler, L., "Performance Evaluation of a Solar Tracking PV Panel". *U.P.B. Sci. Bull., Series C*, vol. 74, pp. 3–10, 2012.
 - [20] Dhanabal, R. et al., "Comparison of Efficiencies of Solar Tracker systems with static panel Single-Axis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount", *Int. J. of Eng. and Technology (IJET)*, vol. 5, no. 2, pp. 1925–1933, 2013.
 - [21] Ghosh, S. and Roy, S., "Designing a Dual-Axis Solar Tracking System", *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 5, no. 12, pp. 9039–9043, 2016.
 - [22] Gupta, P. et al., "Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracker", *IOSR J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 11, No. 5, pp. 26–30, 2016.
 - [23] Vij, K. and Kumar, R., "Theoretical Gain in Solar Energy for Different Sun Tracking Systems in Delhi", *Int. Advanced Research J. in Sci., Eng. and Technology*, vol. 3, no. 7, pp. 213–218, 2016.
 - [24] Duffie, J. A. and Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed.; New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., pp. 18-928, 2013.
 - [25] Chen, J., "Tracking sunlight", in *Physic of Solar Energy*; New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, ch. 4, pp. 77-104, 2011.



Carlos Ramón Batista Rodríguez nació en Holguín, Cuba, el 28 de octubre de 1956. Se graduó en el Instituto de Transporte Ferroviario de Moscú, Rusia, en 1983, como Ingeniero Constructor de Vías Férreas. Posteriormente, obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad de Holguín, Cuba. En el año 2000 obtuvo el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas por la Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba

Ejerció profesionalmente su especialidad de 1983 a 1992. Desde 1992 y hasta 2015 fue docente de tiempo completo en la Universidad de Holguín, Cuba. Ocupó diferentes responsabilidades administrativas y académicas, entre ellas: Coordinador del programa de maestría en Mantenimiento y Reacondicionamiento de Máquinas. Entre 2005 y 2011 impartió clases en varias universidades venezolanas como profesor de programas de maestría. En octubre de 2010 fue invitado por la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador como profesor de un curso de maestría de esa universidad. Entre 2012 y 2015 trabajó como profesor en la Universidad Mandume Ya Nfumayo, en la República de Angola.

Desde septiembre de 2015, C.R. Batista-Rodríguez es docente investigador a tiempo completo en la Universidad "Antonio Nariño" en Tunja, Colombia. Es el Investigador Principal del proyecto titulado: "Estudio y rediseño de un sistema de calefacción solar de agua", presentado por el Grupo de Investigación REM. Código ORCID: 0000-0001-7392-1167.

Rosa Isabel Urquiza Salgado nació en Las Tunas, Cuba, el 4 de mayo de 1960. En 1983 se graduó en el Instituto Pedagógico Estatal de Lípetsk, Rusia, como Licenciada en Matemática y Física.



Trabajó como profesora en la Universidad Pedagógica de Holguín, Cuba, de 1983 a 2001. Desde 2001 y hasta la fecha, en la Universidad de Holguín. Recibió en 2001 el grado científico de Doctora en Ciencias Matemáticas por la Universidad de Oriente, Cuba. Entre 2006 y 2014 impartió clases en varias universidades venezolanas como profesora de programas de maestría. Realizó estancias cortas en la Universidad de Bremen (Bremen, Alemania) en una beca posdoctoral en 2002; la Corporación Educativa del Litoral (Barranquilla, Colombia) como profesora de un Diplomado en 2003; la Universidad de Granada (Granada, España), invitada a un tribunal evaluador de suficiencia investigativa de un Doctorado cooperado en Informática, que coordinó entre 2002 y 2010 por la parte cubana. Desde 2009 es la coordinadora de la maestría en Matemática Aplicada e Informática para la Administración de la Universidad de Holguín, categorizado como Programa de Excelencia por la Junta de Acreditación Nacional de la República de Cuba. Código ORCID: 0000-0001-6299-5830.