

Análisis comparativo del consumo de energía de servomecanismos de seguidores solares de dos ejes aplicando el control on-off, PI y PID

Rosa F. Fuentes-Morales^{1a}, Arturo Díaz-Ponce^{2b}, Fernando Martell-Chávez^{3a}, Manuel I. Peña-Cruz^{4b}

^aCentro de Investigaciones en Óptica A.C. Aguascalientes, México

^bCONACYT- Centro de Investigaciones en Óptica A.C. Aguascalientes, México

Email: ¹fabyfm@cio.mx, ²adiaz@cio.mx, ³fmartell@cio.mx, ⁴mipecc@cio.mx

Abstract: En este trabajo se presenta un análisis comparativo del desempeño del control de posicionamiento y corriente de operación de los motores de un seguidor solar de dos ejes. Se emplean índices de desempeño para evaluar los tres controladores más utilizados en los sistemas de seguimiento solar reportados en la literatura: on-off, proporcional-integral y proporcional-integral-derivativo. Los resultados experimentales muestran que el algoritmo de control utilizado influye en la corriente de funcionamiento del motor y por tanto, en el consumo energético de los actuadores del sistema. El control proporcional-integral obtuvo el mejor rendimiento con un error de seguimiento solar absoluto de $\pm 0.022^\circ$ y un consumo de corriente en el eje azimutal y cenital de 6Wh y 6.8Wh respectivamente. En segundo lugar, el control proporcional-integral-derivativo con un error de seguimiento absoluto de $\pm 0.028^\circ$ y un consumo de corriente en el eje azimutal y cenital de 7.2Wh y 8.4Wh respectivamente. Finalmente, el control on-off obtuvo un error de seguimiento solar absoluto de $\pm 0.22^\circ$ y un consumo de corriente en el eje azimutal y cenital de 12.8Wh y 13.6Wh respectivamente.

Palabras clave—Algoritmos de control; seguimiento solar; consumo de energía

I. INTRODUCCIÓN

Un seguidor solar es un sistema mecatrónico autónomo que sigue el movimiento aparente del sol durante el día; cuenta con una estructura de soporte que debe permanecer perpendicular a los rayos del sol con la finalidad de incrementar la energía recibida en la carga útil. Los seguidores solares generalmente se emplean en sistemas de concentración solar y sistemas de concentración fotovoltaica, en los cuales es imprescindible captar la máxima cantidad de radiación solar directa a lo largo del día para mantener una eficiencia óptima [1]. De acuerdo a su rango de movimiento, los seguidores solares se pueden clasificar en seguidores de uno y dos ejes [2]. En los seguidores de un eje, la rotación de la superficie de captación puede ser horizontal, vertical u oblicua. Estos dispositivos no pueden realizar un seguimiento completo del sol debido a que solo pueden seguir el azimut o el cenit pero no ambos. Por otro lado, los seguidores solares de dos ejes siguen la trayectoria del sol cambiando el ángulo azimut y el ángulo cenit. Estos sistemas, a diferencia de los seguidores solares de un eje, pueden seguir el sol durante todo el año, por lo que permiten que la carga útil sea más eficiente [3].

Los seguidores solares constan de varios componentes esenciales como: subsistemas de transmisión mecánica, motores eléctricos, sensores de posición, unidades de control y sensores solares [4]. Estos dispositivos permanecen activos durante periodos de tiempo prolongados y requieren una alta precisión de seguimiento, lo que incrementa el consumo energético del sistema [5]. Es importante tener en cuenta que el consumo de energía del seguidor solar no debe ser mayor al 3% de la energía generada por la carga útil [6]. El desafío en el diseño de seguidores solares es el equilibrio entre el consumo de energía para generar el movimiento y la precisión de seguimiento [2].

En la literatura se han propuesto diferentes metodologías para minimizar el consumo energético en sistemas de seguimiento solar. Por ejemplo, Rambhowan y Oree [7] emplearon una interesante estrategia para minimizar la energía consumida por el mecanismo de un seguidor solar de dos ejes. Se acoplaron cajas de cambios a los motores para disminuir la velocidad y lograr el par requerido; se empleó una combinación de engranajes y cojinetes para atenuar el efecto del viento y, finalmente se implementó un algoritmo de retorno nocturno para mover el sistema a su posición inicial por la noche. Los resultados mostraron una ganancia de energía del 43.6% en comparación con un panel fotovoltaico fijo y se logró un aumento del 1.6% en la producción de energía con respecto a un sistema de seguimiento de dos ejes convencional. Por otro lado, Helwa *et al.* [8] compararon el consumo energético y la precisión de seguimiento de un sistema fotovoltaico estacionario con diferentes sistemas de seguimiento solar: uno de eje inclinado con y sin concentración, y uno de eje vertical y dos ejes; la energía solar anual de los sistemas de seguimiento aumentó en 31%, 11%, 18% y 30%, respectivamente, con respecto al sistema fotovoltaico fijo. El consumo energético del sistema para el seguidor de un eje inclinado con concentración y sin concentración fue de 50Wh/día y 22Wh/día con errores de seguimiento de $\pm 0.56^\circ$ y $\pm 10^\circ$ respectivamente. Se concluyó que la potencia eléctrica consumida por el seguidor solar es directamente proporcional a la precisión de seguimiento.

Una de las formas más sencillas de disminuir el consumo energético y aumentar la precisión y exactitud de un sistema de seguimiento solar es optimizar el software de control [9]. Por ejemplo, Flores *et al.* [5] propusieron una estrategia de diseño

de seguidores solares de baja potencia en dos etapas. En la primera etapa se propuso la optimización del diseño del seguidor solar y en la segunda se propuso la activación de los motores del seguidor solar de manera secuencial en conjunto con el empleo de tres algoritmos de control: proporcional-integral (PI), proporcional-integral generalizado (GPI, por sus siglas en inglés) y cascada; el error de seguimiento se determinó mediante simulación computacional. Los resultados mostraron que las estrategias de ahorro de energía en conjunto con el empleo del control GPI puede reducir el consumo eléctrico hasta 27.27% con un error de seguimiento máximo absoluto de 0.08° . En un trabajo posterior Flores *et al.* [10] propusieron una metodología con un enfoque heurístico para optimizar el consumo de energía de un sistema de seguimiento solar de dos ejes. Los resultados experimentales mostraron un ahorro de energía del 26.98% al implementar un controlador GPI con errores de seguimiento azimutal y cenital de 0.062° y 0.071° respectivamente.

En la literatura se han reportado diferentes algoritmos de control en seguidores solares, sin embargo, no incluyen un análisis del consumo energético del sistema. Los algoritmos de control más utilizados en sistemas de seguimiento solar son el control on-off, PI, PID y lógica difusa [9]. Por otro lado, los algoritmos de control moderno han sido poco utilizados debido a su complejidad de programación; si bien es cierto que estos controladores tienen ventajas como una mayor robustez ante perturbaciones, mayor precisión de seguimiento y estabilidad [9], requieren un mayor procesamiento de datos; esto influye directamente en el consumo energético del seguidor solar [10]. En este sentido, una opción viable para reducir el consumo eléctrico de los actuadores de un seguidor solar es el empleo de algoritmos de control de bajo consumo eléctrico y con señales de control suaves que eviten el desgaste excesivo de los actuadores. Los algoritmos de control clásico PI y PID son una alternativa accesible, su implementación es sencilla y de bajo costo.

El propósito de este trabajo es realizar un análisis detallado del consumo energético de los motores de un seguidor solar de dos ejes mediante la implementación de tres de los algoritmos de control más utilizados en seguidores solares: el control on-off, PI y PID [9]. Se emplean índices de desempeño para evaluar el rendimiento de cada controlador con la finalidad de definir el algoritmo de control adecuado para el seguidor solar, que sea robusto ante perturbaciones y con señales de control suaves que minimicen el consumo energético del sistema. Este documento está organizado de la siguiente manera. En la sección II se presenta el sistema de seguimiento solar empleado en la experimentación, el modelo matemático del sistema y los índices de desempeño utilizados para realizar el análisis comparativo. En la sección III se describe la configuración experimental y los procedimientos de prueba empleados para la medición de la corriente. En la sección IV se detallan los resultados obtenidos de cinco días de prueba con los tres algoritmos de control implementados. Finalmente, en la sección V se da una breve conclusión.

II. SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR

El sistema de seguimiento solar de dos ejes empleado en la experimentación se muestra en la Fig. 1. La altura del pedestal es de 2.3m y sostiene una unidad de giro cerrado de doble eje con una relación de engranaje helicoidal de 62:1 y dos servomotores de 24V de corriente directa con una relación de transmisión de 236:1 equipados con sus respectivos decodificadores [1]. En la estructura está montado un sensor solar comercial MEMS ISS-A60 con una precisión de seguimiento $\leq 0.01^\circ$ y un campo de visión de $\pm 60^\circ$. El sensor fue utilizado con la finalidad de cerrar el lazo de control y realizar el ajuste en la posición de los servomotores del sistema.

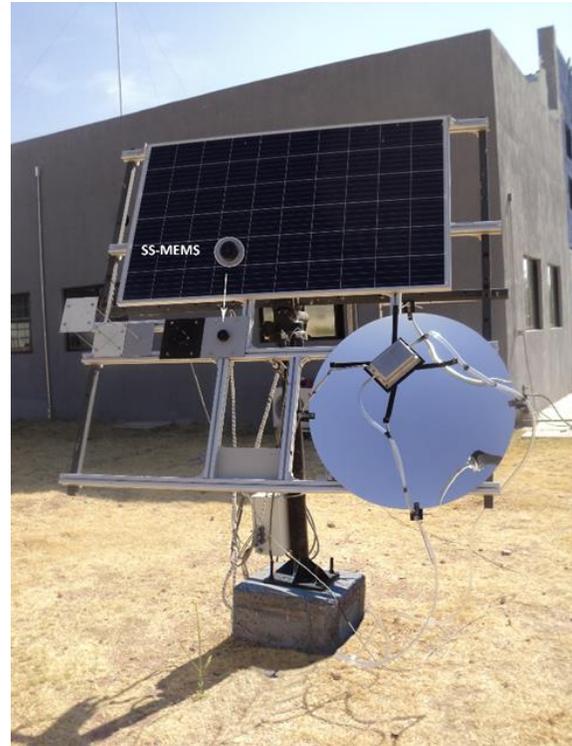


Fig. 1: Seguidor solar empleado en la experimentación

A. Modelo matemático de los motores del seguidor solar

Antes de implementar algoritmos de control en los servomotores del seguidor solar, es importante conocer su dinámica, esto implica obtener el modelo matemático que los represente adecuadamente. Mediante dicho modelo es posible determinar las ganancias del controlador empleando algún método de sintonización. En el caso de estudio, el modelo matemático se obtuvo mediante el método de identificación paramétrica basado en el algoritmo de mínimos cuadrados representado por la ecuación (1).

$$[a, b] = \text{inv}(AA')A'B, \quad (1)$$

donde a y b son los parámetros identificados del servomecanismo que al sustituirlas en la ecuación 2, representan modelo matemático del sistema,

$$G(s) = \frac{b}{s(s+a)}. \quad (2)$$

Para realizar los experimentos y estimar los parámetros del modelo de una forma adecuada fue necesario estabilizar el servomecanismo mediante la implementación de un controlador proporcional derivativo. La programación se realizó en el entorno Matlab Simulink y el software QUARC de Quanser.

En la Fig. 2 se muestra el esquema de conexiones empleado para obtener experimentalmente la identificación paramétrica. La lectura de datos del decodificador y el control de movimiento del servomecanismo se realizó mediante una tarjeta de adquisición de datos Quanser Q8 y, para activar los servomotores, se empleó un puente H modelo BTS7960. Los datos experimentales obtenidos se sustituyeron en la ecuación (2) y se generó el siguiente modelo matemático de los servomotores del sistema (3),

$$G(s) = \frac{3436.7}{s(s+25.2)} \quad (3)$$

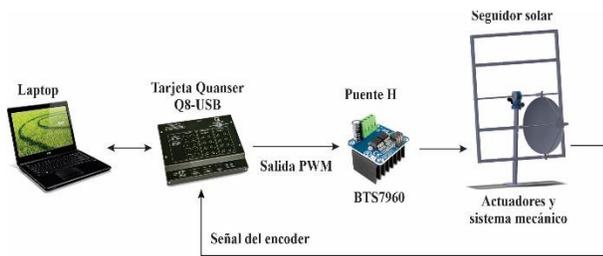


Fig. 2: Diagrama de conexión identificación paramétrica

B. Diagrama de control del seguidor solar

En la Fig. 3 se presenta el diagrama de control del sistema de seguimiento solar. Los principales dispositivos empleados para realizar el seguimiento solar son los siguientes: Una tarjeta de adquisición de datos Quanser-Q8 como unidad de control, dos puentes H BTS7960 para activar los actuadores mediante señales de modulación de ancho de pulso (PWM) y el sensor solar MEMS ISS-A60 para cerrar el lazo de control.

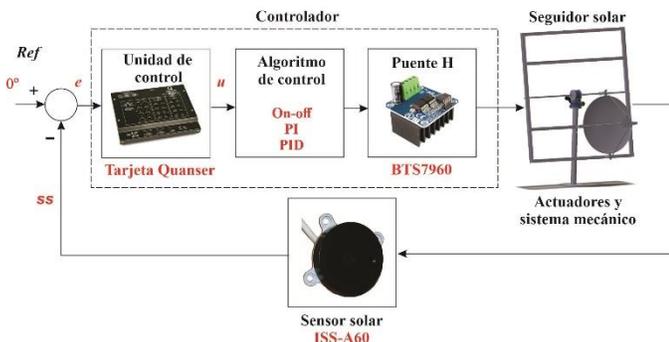


Fig. 3: Diagrama de control del seguidor solar

La tarjeta Quanser Q8 procesa la señal de error de control (e) que se calcula como la diferencia de la señal de referencia (Ref) menos la de retroalimentación del sensor solar (SS); posteriormente esta señal es empleada por un algoritmo de

control que modifica la posición de los servomotores del seguidor solar hasta llegar a 0° . En la Fig. 4 se muestra la relación angular del sensor solar; el eje azimutal ($+X$) y cenital ($+Y$) especifican la posición del rayo solar incidente dentro del campo de visión del sensor.

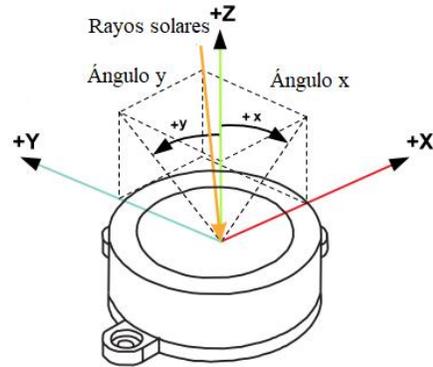


Fig. 4: Relación angular para medir el error de seguimiento [11]

C. Sintonización de los controladores

Para realizar la sintonización de los controladores PI y PID se utilizó la estructura de modelo de control interno (IMC, por sus siglas en inglés). Esta estructura de control está conformada por un controlador y un modelo del proceso real (Fig. 5). Al implementar el modelo interno en el lazo de control, se genera una diferencia $d(s)$ que lleva intrínseco el efecto de la perturbación y la diferencia que existe entre el modelo interno y el proceso real [12]. Este método se puede utilizar para derivar diferentes relaciones de sintonía de controladores PI o PID para una variedad de modelos de funciones de transferencia. Para encontrar los parámetros de sintonización se tomó como base el modelo matemático de los motores del seguidor solar (3); posteriormente se buscaron las ecuaciones de sintonización que coincidieran con la forma del modelo matemático obtenido (ver ecuaciones de sintonía) [13]. Para el control PI se obtuvieron ganancias k_p y k_i de 0.8 y 0.1 respectivamente, mientras que para el control PID las ganancias k_p , k_i y k_d fueron 0.8, 0.16 y 0.031 respectivamente.

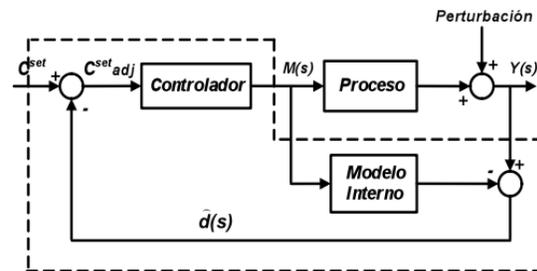


Fig. 5: Sistema de control IMC [12]

D. Criterios de desempeño

Para medir el desempeño de los tres controladores se emplearon los criterios de la integral del error cuadrático en un

lapso de tiempo (IEC_T), el error absoluto máximo (EAM) y la variación total de control (VTC); Ecuaciones 4, 5, 6, respectivamente.

El índice IEC_T se emplea para conocer la suma del error instantáneo entre dos instantes de tiempo T_1 y T_2 , donde e representa el error y k la ganancia.

$$IEC_T = \int_{T_1}^{T_2} |ke^2| dt \quad (4)$$

Del mismo modo el EAM determina el valor del error absoluto máximo en un lapso de tiempo, $e[n]$ representa la señal del error filtrada.

$$EAM = \max|e[n]| \quad (5)$$

$$N_1 \leq n \leq N_2$$

Finalmente, el VTC determina la suavidad de la señal de control en un lapso de tiempo. Donde $u[n]$ representa la muestra n de la señal de control u .

$$VTC = \int_{N_1}^{N_2} |u[n] - u[n - 1]| \quad (6)$$

III. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

El seguimiento solar experimental se realizó durante 5 días en un horario de 8:00 a 2:00pm en condiciones de cielo despejado y velocidad del viento menor a 4 m/s. Se implementaron los tres algoritmos de control en el seguidor solar descritos anteriormente: on-off, PI y PID. Para realizar la medición del consumo eléctrico de los motores se utilizaron dos sensores de corriente ACS712 los cuales se conectaron en las salidas para motor de los puentes H BTS7960. En la Fig. 6 se presentan los elementos empleados en la experimentación.

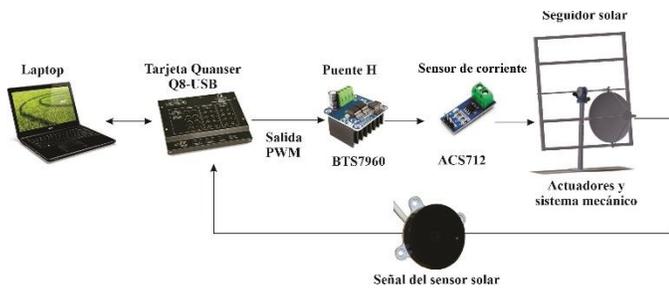


Fig. 6: Elementos empleados para la medición del consumo energético de los motores del seguidor solar.

Cada día de prueba se experimentó con los tres controladores. El procedimiento se detalla a continuación:

- 1) Para cada algoritmo de control se realizaron 10 pruebas de seguimiento solar con una duración de 10 minutos cada una en el eje azimutal y cenital.
- 2) En cada experimento se agregó una perturbación con forma de pulso en los minutos 5 y 6 con una amplitud de -0.5° y 0.5° , respectivamente.

- 3) Se obtuvieron índices de desempeño EAM, IEC_T y VTC en cada una de los experimentos realizados. Tomando en cuenta que en cada prueba las perturbaciones ocurren entre el minuto 5 y 6, se consideró $T_1=3\text{min}$ (180s) y $T_2=8\text{min}$ (480s), un tiempo total de 5 min por cada experimento. Para el análisis se tomó en cuenta un intervalo de tiempo cercano a donde se encuentran las perturbaciones, sin considerar el error en estado transitorio que es un lapso de tiempo muy corto en comparación con el tiempo que el sistema permanece en estado estacionario a lo largo del día.
- 4) En cada prueba de 10 min se llevó a cabo el monitoreo del consumo de corriente y se midió la señal de error e . Finalmente, se obtuvo el promedio de los valores medidos en las 10 pruebas realizadas.
- 5) Los datos obtenidos se guardaron en el espacio de trabajo de Matlab para su posterior análisis.

IV. RESULTADOS

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos realizados. En las Figs. 7 y 8 se muestran las gráficas del error de seguimiento absoluto del control on-off del eje azimutal y cenital, respectivamente. En éstas se puede observar que la señal no alcanza la referencia de 0° . El error de seguimiento absoluto en el eje azimutal y cenital es de 0.23° y 0.22° , respectivamente (ver tablas 1 y 2). En el minuto 5 se introduce una primera perturbación con una amplitud de -0.5° . Se observa como el sistema responde brusco y posteriormente busca la referencia de 0° ; sin embargo, no alcanza a llegar a la referencia antes de que entre la segunda perturbación. En el minuto 6, se introduce una segunda perturbación con una amplitud de 0.5° y el sistema vuelve a buscar la referencia de 0° , sin embargo, la sobrepasa y se posiciona nuevamente en 0.23° en el eje azimutal y 0.22° en el eje cenital.

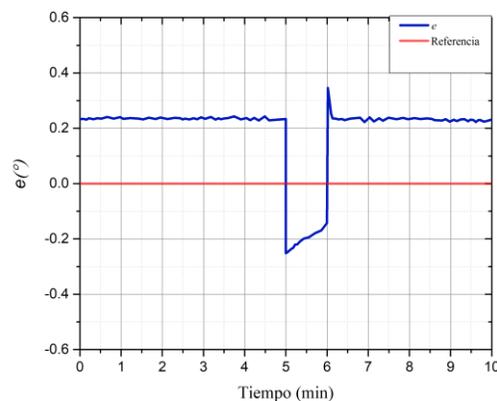


Fig. 7: Error de seguimiento en el eje azimutal mediante el control on-off

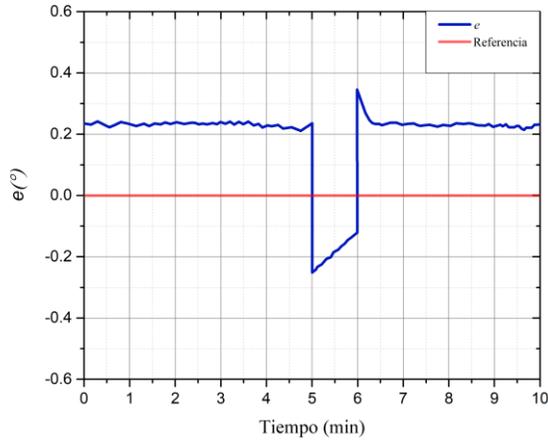


Fig. 8: Error de seguimiento en el eje cenital mediante el control on-off

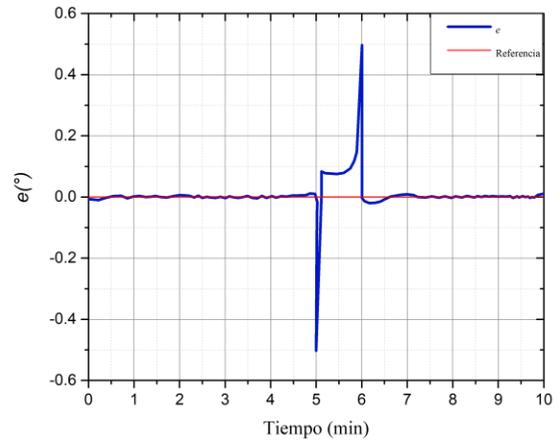


Fig.10: Error de seguimiento en el eje cenital mediante el control PI

En las Figs. 9 y 10 se muestra el error de seguimiento absoluto e del control PI del eje azimutal y cenital. Del mismo modo que en el caso anterior, en el minuto 5 se introduce la primera perturbación con una amplitud de -0.5° . Se observa como el sistema inmediatamente vuelve a buscar la referencia de 0° . En este caso, la señal e alcanza a llegar a la referencia a un valor de 0.08° aproximadamente antes de que entre la segunda perturbación. En el minuto 6, se introduce la segunda perturbación con una amplitud de 0.5° y el sistema vuelve a buscar la referencia hasta que logra llegar al estado estacionario en un tiempo aproximado de 30 segundos, alcanzando un error de seguimiento de 0.001° tanto en el eje azimutal como en el cenital. En las gráficas de ambos ejes se observan pocas oscilaciones después de que pasan las dos perturbaciones.

Por último, en las Figs. 11 y 12 se muestra el error de seguimiento absoluto con el control PID. Después de la primera perturbación, el sistema tiende a buscar la referencia de 0° . Inicialmente, tanto para el eje azimutal como para el cenital, después de la primera perturbación el sistema presenta un error de seguimiento de 0.1° . El error disminuye en ambos ejes hasta que se presenta la segunda perturbación. Al pasar la segunda perturbación, el sistema tiende a oscilar un tiempo aproximado de 2.5 minutos antes de llegar a la estabilidad. Es importante destacar que en el control PID el sistema tarda más en llegar a la estabilidad después del minuto 6 que con el control PI. En general, cuando se emplea un controlador PID, la acción derivativa produce un amortiguamiento que reduce o elimina los sobretiros, sin embargo, esto no ocurre cuando el sensor solar presenta en la medición un elevado ruido de alta frecuencia debido a la radiación difusa; la acción derivativa amplifica el ruido produciéndose oscilaciones y disminuyendo el desempeño del sistema [14].

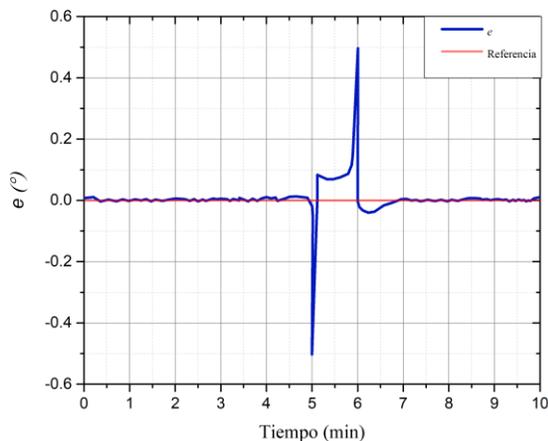


Fig. 9: Error de seguimiento en el eje azimutal mediante el control PI

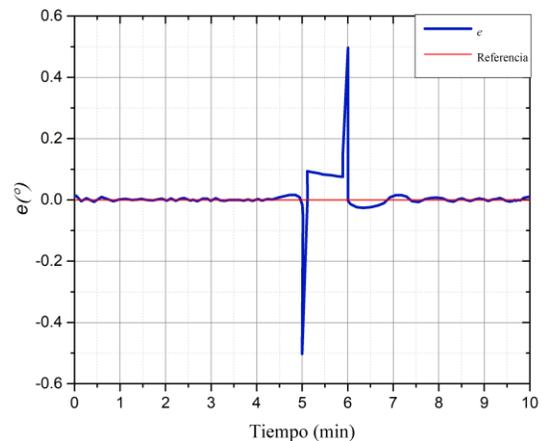


Fig.11: Error de seguimiento en el eje azimutal mediante el control PID

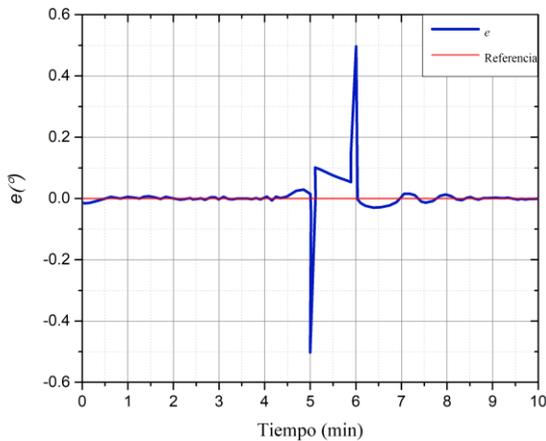


Fig.12: Error de seguimiento en el eje cenital mediante el control PID

En las tablas 1 y 2 se presentan los resultados obtenidos del consumo de corriente, error de seguimiento y los índices de desempeño de los motores del eje azimutal y cenital del seguidor solar para los tres controladores bajo estudio. Los valores de consumo eléctrico obtenidos representan el promedio de las 10 pruebas realizadas con una duración de 10 minutos cada una. El consumo energético del control on-off en el eje azimutal y cenital fue de 12.8 Wh y 13.6 Wh respectivamente, que es aproximadamente 51.56% y 40% mayor que en el control PI y PID respectivamente en ambos ejes; así mismo, el error de seguimiento absoluto en el eje azimutal y cenital fue de 0.23° y 0.22°, respectivamente, que es 90% y 87.27% mayor que en el control PI y PID respectivamente. Con el control on-off, al presentarse las perturbaciones, el sistema responde de forma drástica y esto se refleja en un mayor consumo de corriente en los motores, lo que con el tiempo afectará su funcionamiento. Es importante mencionar que aunque el control on-off es el más utilizado en sistemas de seguimiento solar [9], con respecto al consumo energético y precisión de seguimiento no es el más adecuado.

Por otro lado, el control PI presentó un error de control absoluto e de 0.022° en ambos ejes y fue el que obtuvo un menor consumo de corriente. Esto también se refleja en los criterios de desempeño obtenidos para este controlador, ya que el EAM, IEC_T y VTC fueron menores en ambos ejes que en el control on-off y el PID. Esto representa que el control PI es el que presentó menor número y amplitud de las oscilaciones y la señal de control es más suave que las correspondientes al control on-off y PID.

Tabla 1 Índices de desempeño, error de seguimiento y consumo energético eje azimutal

Control	$e(^{\circ})$	Consumo (Wh)	EAM	IEC_T	VTC
On-off	0.23	12.8	11.75	2.34	1.38
PI	0.022	6.0	8.71	1.58	0.52
PID	0.028	7.2	9.69	2.61	0.76

Tabla 2 Índices de desempeño error de seguimiento y consumo energético en el eje cenital

Control	$e(^{\circ})$	Consumo (Wh)	EAM	IEC_T	VTC
On-off	0.22	13.6	13.27	2.55	1.41
PI	0.022	6.8	7.45	1.76	0.43
PID	0.028	8.4	8.76	2.84	0.72

Es importante notar que entre el control PI y PID hubo poca variación en sus resultados. Sin embargo, obtuvo un mejor desempeño el control PI. Por otro lado, el control PID obtuvo un mejor desempeño y un menor consumo de corriente que el control on-off.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede decir que el algoritmo de control, la precisión de seguimiento y el consumo energético de los motores de un seguidor solar están relacionados. Si bien es cierto que en la literatura se menciona que un sistema de seguimiento solar de alta precisión tendrá un mayor consumo eléctrico, es posible lograr el equilibrio entre precisión de seguimiento y consumo energético mediante la implementación de algoritmos de control sencillos y de bajo costo.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis comparativo del consumo de corriente promedio en los motores de un seguidor solar de dos ejes, los cuales fueron accionados mediante un control on-off, un PI y un PID; se emplearon criterios de desempeño para evaluar los tres controladores y determinar el algoritmo de control con el más bajo consumo eléctrico y la señal de control más suave que contribuya al mejor funcionamiento y menor desgaste de los motores del seguidor solar. Los resultados experimentales demostraron que el algoritmo de control empleado influye considerablemente en el consumo energético del sistema.

Con respecto al análisis de los controladores, se comprobó que el control con menor rendimiento, mayor consumo energético y mayor error de seguimiento fue el on-off. En este sentido, el control PI obtuvo el mejor desempeño y el menor consumo energético, tanto para el eje azimutal, como el cenital, generando un error de seguimiento absoluto del lazo de control de 0.022° en ambos ejes; un 90% menor que el conseguido con el control on-off, el control más empleado en seguidores solares. Asimismo, el consumo energético fue de 6Wh y 6.8Wh en el eje azimutal y cenital, respectivamente, lo que representa el 46.87% y el 50% del consumo obtenido por el control on-off.

Finalmente, el control PID obtuvo un menor rendimiento que el control PI debido a que con este controlador los motores presentaron oscilaciones de mayor amplitud y el sistema tardó más en llegar al estado estacionario. Sin embargo, el control PID obtuvo un menor error de seguimiento y un mejor desempeño que el control on-off. Así mismo, el consumo energético del control PID en el eje azimutal y cenital fueron de 7.2Wh y 8.4Wh respectivamente que representa el 56.25% y 61.76% del consumo obtenido por el control on-off.

Se puede concluir que el empleo de algoritmos de control clásico en sistemas de seguimiento solar es una alternativa sencilla y económica para aumentar la precisión de seguimiento en seguidores solares, obteniendo así un mejor aprovechamiento de la energía solar y a la vez reducir el consumo eléctrico de los actuadores del sistema, prolongando así su correcto funcionamiento y vida útil.

Agradecimiento

Rosa F. Fuentes-Morales desea agradecer a CONACyT México por su apoyo de una beca de doctorado.

REFERENCIAS

- [1] Marthoz Angulo-Calderón, Iván Salgado-Tránsito, Iván Trejo-Zúñiga, Carlos Paredes-Orta, Sajjad Kesthkar, and Arturo Díaz-Ponce. Development and accuracy assessment of a high-precision dual-axis pre-commercial solar tracker for concentrating photovoltaic modules. *Applied Sciences*, 12(5):2625, 2022. Modules. *Applied Sciences*, 12(5), 2625.
- [2] Rajesh Singh, Suresh Kumar, Anita Gehlot, and Rupendra Pachauri. An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:3263–3278, 2018.
- [3] AZ Hafez, AM Yousef, and NM Harag. Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91:754–782, 2018.
- [4] Gerro Prinsloo and RT Dobson. Solar tracking. Stellenbosch: SolarBoo7s. ISBN 978Y0Y620Y61576Y1, pages 1–542, 2015.
- [5] Diego A Flores-Hernández, Sergio Palomino-Reséndiz, Alberto Luviano-Juárez, Norma Lozada-Castillo, Jorge I Chairez-Oria, and Ignacio Anton. Design strategy for low-power consumption in solar trackers. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2012, page 050003. AIP Publishing LLC, 2018.
- [6] Hossein Mousazadeh, Alireza Keyhani, Arzhang Javadi, Hossein Mobli, Karen Abrinia, and Ahmad Sharifi. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(8):1800–1818, 2009.
- [7] Yougeshwarsingh Rambhawan and Vishwamitra Oree. Improving the dual-axis solar tracking system efficiency via drive power consumption optimization. *Applied Solar Energy*, 50(2):74–80, 2014.
- [8] NH Helwa, ABG Bahgat, AMR El Shafee, and ET El Shenawy. Maximum collectable solar energy by different solar tracking systems. *Energy sources*, 22(1):23–34, 2000.
- [9] Rosa F Fuentes-Morales, Arturo Diaz-Ponce, Manuel I Peña-Cruz, Pedro M Rodrigo, Luis M Valentín-Coronado, Fernando Martell-Chávez, and Carlos A Pineda-Arellano. Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review. *Solar Energy*, 212:203–219, 2020.
- [10] Diego A Flores-Hernández, Sergio I Palomino-Reséndiz, Alberto Luviano-Juárez, Norma Lozada-Castillo, and Octavio Gutierrez-Frías. A heuristic approach for tracking error and energy consumption minimization in solar tracking systems. *IEEE Access*, 7:52755–52768, 2019.
- [11] S. MEMS®, Solar tracking sensors, Accessed in July 2021 dirección: <https://www.solar-mems.com/solar-tracking/>
- [12] Yohn, García, and Israel Lobo. "Controlador PID integrado por la estructura de control de modelo interno (IMC) y lógica difusa." *Ciencia e Ingeniería* 30.1 (2008): 29-40.
- [13] Dale E. Seborg, et al. *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2016.
- [14] Rubén Garrido and Arturo Díaz. Cascade closed-loop control of solar trackers applied to HCPV systems. *Renewable Energy*, 97:689–696, 2016.