

Aplicación del algoritmo PID disminuye error de posicionamiento en heliostatos.

Saldaña Milla Fernando Arístides¹,

fsaldana@uct.edu.pe

¹Universidad Católica de Trujillo, Benedicto XVI

Los hornos solares, como el de Odeillo en Francia, usan la concentración de la radiación solar para alcanzar temperaturas de hasta los 3400 °C por medio de reflexión con heliostatos. Las torres solares como la de Almería en España, son centrales eléctrica helio-térmicas que concentran la luz solar por el posicionamiento de los heliostatos por medio de sistemas de control, desde los electromecánicos simples hasta los más sofisticados sistemas automáticos de control computarizados con movimiento en dos grados de libertad (altura y azimut), para reflejar la luz solar hacia un punto de concentración con cierto grado de error. La tecnología que controla el movimiento de estos heliostatos, para la disminución del error, se ha investigado y desarrollado principalmente en países como Francia, España, Alemania y otros, en los que se usan hornos solares, torres solares y otras aplicaciones energéticas; sin embargo, éstas no están disponibles en países como el Perú, por lo que resulta dificultosa su aplicación y adecuación. Ante este requerimiento tecnológico para el control de heliostatos por medio de la minimización del error, en este ensayo se plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo la aplicación del algoritmo PID disminuye el error de posicionamiento en heliostatos?, para lo que se plantea la siguiente solución: Disminuir el error entre la posición controlada y la posición deseada del heliostato. En primer lugar, con un algoritmo PID en lazo abierto para una aproximación lejana y un error de hasta 100 mrad y, en segundo lugar, con el algoritmo PID en lazo cerrado para un ajuste fino de hasta 1 mrad de error angular de posicionamiento del heliostato. Para resolver este problema, se plantea primero la evaluación de los requerimientos y tendencias en la fabricación de heliostatos; luego, una revisión en los tipos de movimiento de los principales heliostatos, la revisión de las características técnicas, una revisión de las teorías sobre algoritmos de control, la aplicación de los algoritmos de control PID, consideraciones de variables externas como las condiciones climáticas y solución con algoritmos PID en lazo cerrado para una aproximación lejana y en lazo cerrado para un ajuste fino.

El sector que se dedica a la producción de energías renovables, nuevamente está investigando y experimentando en tecnologías orientadas al control de campos de heliostatos para la concentración de la luz solar en focos estáticos. Poniendo énfasis en la optimización de la óptica

de los espejos reflectores y en las teorías de control (Jafrancesco, Sansonin, Francini y Fontani, 2016). Los campos de helióstatos son las aplicaciones más usadas para las torres solares que proporcionan energía con costos relativamente menores al de otro tipo de energías y generan poca contaminación ambiental, puesto que proviene de una fuente de energía limpia. (Vant-Hull y Hildebrandt, 1975). Los helióstatos son unidades independientes diseñadas para seguimiento solar o reflexión solar hacia un punto de concentración. Se han desarrollado diferentes tipos de estos elementos, de acuerdo a las necesidades técnico-económicas que su mismo progreso ha ido mostrando en torno a una mayor obtención de radiación solar al menor costo posible (Zentner, 1975). Se tiene que seleccionar el tipo de sistema de coordenadas con que se van a realizar los cálculos. Los sistemas de coordenadas usados son: Las coordenadas cartesianas tridimensionales, cuyos ejes ortogonales son los ejes X, Y y Z y, las coordenadas cilíndricas, cuyo análisis proporciona unas ecuaciones más sencillas y que pueden identificar fácilmente la posición solar (Collado y Turégano, 1989), teniendo en cuenta el ángulo de elevación, el azimut y la velocidad con que se mueve o se desplaza el sol respecto de una coordenada en la tierra; de esto dependerá los ángulos con que se irán corrigiendo las diferentes posiciones del helióstato; pueden tener diferentes tipos de actuadores responsables de realizar el movimiento según lo determinado por la estructura del sistema de control que lo guíe, ya sea con algoritmos de control PID aplicado al lazo abierto y de control de lazo cerrado o con otro tipo de algoritmos en los sistemas de control. (Shyam, Acharya y Ghosal, 2017).

Los sistemas de orientación, control y guía se diseñan en base a sensores, circuitos electrónicos analógicos y digitales, circuitos eléctricos, motores, programas de computadoras, interfaces de entrada y salida de datos, sistemas mecánicos, transmisiones mecánicas y otros sistemas que son necesarios para dar soporte y orientación a los helióstatos reflectores: Se debe tener en cuenta la precisión de sistema de seguimiento, puesto que debe ser por lo menos de 1 mrad.

La guía de helióstatos se fundamenta en sistemas de control de lazo abierto, para una orientación de aproximación no muy precisa y, sistemas de control de seguimiento preciso para un ajuste fino. Se puede emplear un sistema híbrido con el que se guía el helióstato, un acercamiento con una precisión de 100 mrad con el uso de un sistema de control de lazo abierto, no muy preciso y, un ajuste fino con una precisión de 1 mrad usando control computarizado. (Vant-Hull y Hildebrandt, 1975).

Un modelo de helióstato basado en el desplazamiento de elevación con barra roscada milimétrica, usa un algoritmo basado en el control de un motor, desde el que se puede guiar las dos direcciones de movimiento; un sistema controlador de tres posiciones, que ordena las direcciones de movimiento del motor según el signo y magnitud del error. Las señales de los elementos sensores son manipulables y totalmente digitalizadas; se define la referencia deseada y se representa el posicionamiento adecuado del sistema obteniéndose el error, es decir, la diferencia entre la señal de comando generada por el controlador PID para moverse el motor en una dirección u otra. (Barberena et al, 2016).

Para el estudio del control de helióstatos concentradores, se deben conocer las leyes de reflexión de la luz. Se debe teorizar su estudio definiendo en primer lugar a un rayo luminoso como un haz de luz con el área de sección transversal diferencial muy pequeña. Las leyes de reflexión fueron conocidas por los griegos en el siglo IV o III a.C., pero fue Snell (1580-1626) quien planteó las leyes actuales de la reflexión y refracción. El rayo incidente se define como un rayo que sale de la fuente luminosa y se aproxima en línea recta a una superficie determinada. El punto de incidencia es el lugar geométrico en donde el rayo incidente hace contacto con la superficie. (Ittner, 1980). La recta normal es una línea de construcción dibujada perpendicularmente a la superficie en el punto de incidencia. El rayo reflejado es la porción del rayo incidente que sale de la superficie en el punto de incidencia. El ángulo de incidencia es el ángulo entre el rayo incidente y la recta normal a la superficie. El ángulo de reflexión es el ángulo entre la recta normal y el rayo reflejado. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. El rayo incidente, el normal y el rayo reflejado son coplanares, es decir, están en un mismo plano. La reflexión especular (reflexión regular) ocurre cuando los rayos paralelos incidentes también se reflejan paralelos desde una superficie lisa. Si la superficie es rugosa (a nivel microscópico), los rayos incidentes paralelos ya no son paralelos cuando se reflejan. Esto da como resultado una reflexión difusa (reflexión irregular). Las leyes de la reflexión se aplican a la reflexión difusa. Se puede considerar que la superficie irregular está compuesta por una gran cantidad de pequeñas superficies reflectantes planas colocadas en ángulos ligeramente diferentes. La iluminación indirecta (o difusa) produce sombras suaves, por lo que produce menos fatiga visual que la iluminación directa más dura. (Julajaturasiraratha, Jonburom y Pornsuwancharoen, 2011).

Existen distintos tipos de mecanismos para el seguimiento solar según el tipo de movimiento que realicen; pueden ser de uno o dos ejes (grados de libertad). Las altas temperaturas involucradas

en los procesos térmicos del horno solar exigen óptimos niveles de eficiencia óptica en el proceso de concentración de la radiación, minimizando las pérdidas por desbordamiento de flujo. Esta eficiencia influye principalmente la precisión de la orientación de los helióstatos, por lo cual es necesario la implementación de seguidores en dos ejes con programación astronómica. En este tipo de seguidores existen dos grados de libertad: La rotación alrededor de un eje vertical, definida por el ángulo azimutal y la rotación alrededor de un eje horizontal, definida por el ángulo de elevación del helióstato. Los seguidores de dos ejes, azimut - elevación, de programación astronómica, están asociados a costos elevados por el uso de dos motores, reductores y porque tienen cierta complejidad en su algoritmo. Sin embargo, su utilización está cada vez más difundida debido a la importante mejora que genera en la eficiencia de los concentradores. Estos sistemas detectan la posición del sol con alta precisión y no tienen el problema del sensor de luz, pero aun así necesitan un sensor de realimentación para detectar si el reflector está en una ubicación exacta. (Rubio, Ortega, y Gordillo, 2010).

El control de helióstatos se ha realizado normalmente sin tener la consideración de las condiciones climatológicas del área geográfica en donde son colocados. La importancia que deriva de la inspección de las condiciones climatológicas hace que se deba analizar por sectores el campo de helióstatos, pues de estar nublado en algún sector, se toma una determinación de orientación individual de cada helióstato. Estos enfoques funcionan bien sólo cuando la irradiancia del sol es suficiente para hacer una imagen clara y, podría verse significativamente afectado por condiciones climáticas o factores de ubicación. (Kim, y Cho, 2019). Las condiciones climáticas son importantes y determinantes para el aprovechamiento de la energía solar; uno de los factores que se considera es la irradiancia solar, que determina un aumento en la cantidad de energía en los hornos solares. El algoritmo de análisis de regresión múltiple corrige los factores de irradiancia, que en días soleados puede afectar al sistema de guía de los helióstatos. (Nakayama et al, 2019). Los algoritmos de control de sistemas de seguimiento automático, pueden basarse en el control proporcional, integral y derivativo (PID), control realimentado, por actuadores en paralelo, en cascada, control de relación, control de rango dividido, control selectivo, anticipativo, adaptativo, predictivo, control por lógica difusa, redes neuronales y otras estrategias de control. (Gruber y Bordons, 2011). Para el caso del control de los helióstatos, el control de la precisión se basa, fundamentalmente, en la aplicación de una estrategia de lazo abierto, para lograr un acercamiento al punto deseado con una precisión muy holgada. Luego se aproxima con una precisión más exacta

hasta tener un error muy pequeño con un sistema de control realimentado. (Rizal, Wibowo y Feriyadi, 2013).

El algoritmo de control PID está relacionado con la corrección del error existente entre la posición requerida, que es la variable independiente y , la posición controlada, que es la variable dependiente. Esta corrección trata de disminuir el error entre estas dos variables, aplicando un algoritmo de amplificación proporcional negativa P . Si existe diferencia entonces, aún aplica una corrección del error con una función integrativa que proporciona un efecto de respuesta rápida ante una variación poco significativa del error, logrando estabilizar dicha variación. El siguiente paso es controlar la función de integración I del error, con una función derivativa D aplicada al resultado de la aplicación de la amplificación negativa P y la función integrativa del error que, como resultado tendremos una corrección disminuida del error.

Los sistemas de control lazo abierto son procesos en los que la variable de salida, en este caso de la posición actual del helióstato, no depende de la comparación con la variable de posicionamiento deseada. La estrategia PID trata de disminuir la diferencia entre la última posición conocida, que puede ser una posición cero, inicial del helióstato, con la posición deseada, que es donde se requiere tener al helióstato. El error resultante en esta estrategia de control PID es elevada, puesto que la precisión sólo se basa en eliminar el error que hay entre la posición inicial y la posición requerida, sin corregir el error instantáneo entre las dos posiciones. Para corregir este error, se emplea la estrategia PID en lazo cerrado, que va a disminuir el error instantáneo, midiendo necesariamente con la realimentación del estado actual de la variable de posicionamiento final respecto de la posición de la variable deseada, logrando una disminución del error con el ajuste fino instantáneamente. (Alfaro, Arrieta y Vilanova, 2009).

También es posible seguir la posición solar teniendo en cuenta el control básico *on – off* y un sistema mecánico de tornillo sin fin, el cual mueve dos varillas roscadas sobre un eje horizontal y uno de elevación; este sistema logra controlar el movimiento de los paneles con cierto grado de precisión, ya que cuenta con tres estrategias de control según se vayan acercando al punto deseado. (Stamatescu et al, 2014).

Otra manera de realizar el seguimiento solar, parte de la colocación del panel en una rotación hemisférica para rastrear el movimiento del sol y así aumentar la generación total de electricidad. Una simulación e implementación del algoritmo de control más adecuado y eficiente es el seguidor

solar de doble eje que puede rotar en dirección de acimut y elevación. La simulación proporciona los ángulos del rastreador que posicionan el panel solar a lo largo de los rayos del sol, de tal manera que el panel absorbe la irradiación solar máxima. (Ozcelik, Prakash y Chaloo, 2011). Los algoritmos de control automático de seguimiento solar deben tener una alta precisión, pues reflejarán los rayos solares; una estrategia (Yong-Hua y Hongyi, 2018) usada en estos sistemas de control PID de respuesta de estado adaptativa universal, que logra un rendimiento de seguimiento asintótico. Este tipo de algoritmo evita que el sistema mecánico conformado por los heliostatos oscile, debido a perturbaciones como el viento, la inercia y otros factores.

Según lo expuesto en este ensayo se concluye que, con la aplicación del algoritmo PID se disminuye el error de posicionamiento en los heliostatos. Al disminuir el error entre la medición de la posición controlada y la medición de la posición deseada del heliostato; nos encontramos, en primer lugar, con un algoritmo PID en lazo abierto, que aproxima la posición inicial del heliostato y la posición requerida, con un error de hasta 100 mrad y, en segundo lugar, con el algoritmo PID en lazo cerrado, que disminuye el error entre la diferencia de la posición instantánea y la posición requerida del heliostato y que como resultado brinda un ajuste fino de hasta 1 mrad de error de posicionamiento del heliostato; logrando con este algoritmo PID, la disminución del error de posicionamiento del heliostato.

Referencias

- Alfaro, M., Arrieta, O. y Vilanova, R. (2009). Control de Dos-Grados-de-Libertad (2-GdL) aplicados al “Benchmark” de Sistemas para Controladores PID. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, Vol. 6, pp. 59-67. Doi: 10.1016/S1697-7912(09)70093-7.
- Ashith, R., Acharya, M. y Ghosal, A. (2017). A heliostat based on a three degree-of-freedom parallel manipulator. *Solar Energy*, Vol. 157, pp. 672–686. Doi: 10.1016/j.solener.2017.08.073
- Barberena, J., Mutuberria, A., Sánchez, M. y Bernardos, A. (2016). State-of-the-art of Heliostat Field Layout Algorithms and their Comparison. *Energy Procedia*, Vol. 93, pp 31-38. Doi: 10.1016/j.egypro.2016.07.146.
- Collado, F. y Turégano J., (1989). Calculation of the annual thermal energy supplied by a defined heliostat field. *Solar Energy*, Vol. 42, pp. 149-165. Doi: 0038-092X/89
- Gruber, J. y Bordons, C., (2011). Control predictivo no lineal basado en modelos de volterra. Aplicación a una planta piloto. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*. Vol. 4, pp. 34-45. Doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.738
- Ittner, B. (1980). An array of directable mirrors as a photovoltaic solar concentrator. *Solar Energy*, Vol. 24, pp. 221-234. Doi: 0038-092X/80/0301-0221S02.00/0

- Jafrancesco, P., Sansoni, F., Francini y Fontani, D., (2016). Strategy and criteria to optically design a solar concentration plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, pp. 1066-1073. Doi: 10.1016/j.rser.2016.02.005
- Julajaturasiraratha, S., Jonburom, W. y Pornsuwancharoen, N., (2011). The experiment of double solar energy by reflection light method. *Procedia Engineering* Vol. 32, pp. 522 – 530. Doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.1303
- Kim, K., y Cho, S., (2019). An efficient concentrative photovoltaic solar system with Bayesian selection of optimal solar tracking algorithms. *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 83, pp.105 - 618. Doi: 10.1016/j.asoc.2019.105618
- Nakayama, K., Tsuji, M., Chantana, J., Kawano, Y., Nishimura, T., Hishikawa, Y. y Minemoto T., (2019). Description of short circuit current of outdoor photovoltaic modules by multiple regression analysis under various solar irradiance levels. *Renewable Energy*, Vol. 147, pp. 895-902. Doi: 10.1016/j.renene.2019.09.083.
- Ozcelik, S., Prakash, H. y Chaloo, R., (2011). Two-Axis Solar Tracker Analysis and Control for Maximum Power Generation. *Procedia Computer Science*, Vol. 6, pp. 457-462. Doi: 10.1016/j.procs.2011.08.085.
- Rizal, Y, Wibowo, S. y Feriyadi, H., (2013). Application of Solar Position Algorithm for Sun-Tracking System. *Energy Procedia*. Vol. 32, pp. 160-165. Doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.021
- Rubio, F., Ortega, M. y Gordillo, F. (2010). Control de posición e inercial de plataforma de dos grados de libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, Vol. 7, pp. 65-73. Doi: 10.1016/S1697-7912(10)70061-3.
- Stamatescu, I., Făgărășan, I., Stamatescu, G., Arghira, N. y Iliescu, S., (2014). Design and Implementation of a Solar-tracking Algorithm. *Procedia Engineering*, Vol. 69, pp. 500-507. Doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.018.
- Tharamuttam, J. y Keong, A., (2017). Design and Development of an Automatic Solar Tracker. *Energy Procedia*, Vol. 143, pp. 629-634. Doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.738
- Vant-Hull, L., y Hildebrandt, A., (1975). Solar thermal power system based on optical transmission. *Solar Energy*, Vol. 18, pp. 31-39. Doi: 10.1016/0038-092x(76)90033-5
- Yong-Hua, L. y Hongyi, L. (2018). Adaptive asymptotic tracking using barrier functions. *Automatica*, Vol. 98, pp. 239-246. Doi: 10.1016/j.automatica.2018.09.017
- Zentner, R., (1977). Performance of low cost solar reflectors for transferring sunlight to a distant collector. *Solar Energy*, Vol. 19, pp. 15-21. Doi: 10.1016/0038-092X(77)90084-6