

Diseño e implementación de la parte mecánica de movimiento para una unidad de seguimiento solar con dos grados de libertad aplicado a generación fotovoltaica

Design and implementation of the mechanical movement part for a solar tracking unit with two degrees of freedom applied to photovoltaic generation

Jorge Manuel Barrios Sánchez¹, Roberto Baeza Serrato¹, Roció Camarena Martínez¹

¹ departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Yuriria 38944, Guanajuato, México

Resumen

La presente investigación describe la simulación, selección de materiales, elementos, armado y ensamblaje de la parte mecánica de una unidad de seguimiento solar con dos grados de libertad (Azimut y elevación) para un panel fotovoltaico (FV) Upsolar UP-M250P de 250 Wp. el objetivo principal es diseñar una estructura electromecánica con movimiento en dos grados de libertad, la cual soporte y posibilite el movimiento del panel seleccionado. Se expone el proceso de diseño de la estructura, la selección de componentes y la construcción de la unidad experimental de seguimiento solar, tomando como punto de partida las características del panel seleccionado, los requerimientos técnicos de este tipo de sistemas y el lugar de instalación. Esta unidad consiste en una estructura mecánica en su primera fase que permite por medio de dos motorreductores, modificar la orientación e inclinación del panel FV, con el objetivo de aumentar la captación de radiación solar incidente sobre éste. Las posiciones Azimut y elevación definen la posición de un cuerpo con respecto al sol, El rango angular de excursión y velocidad del movimiento de la unidad experimental es de 0 - 360° y 0,047 rpm azimut y 40° - 120° y 0,1667 rpm para altura solar, se tiene una limitación en el movimiento de elevación en la que se le dio prioridad al rango angular donde se tiene un aprovechamiento mayor de la radiación solar, se tiene un consumo de corriente por cada actuador entre 340 mA y 500 mA a 20 V, dependiendo de factores como la posición angular, velocidad y dirección del viento. Este trabajo constituye en la primera fase para la implementación de un seguidor solar a escala real con dos grados de libertad de seguimiento automático con el fin de obtener una mayor eficiencia en la captación de energía solar.

Palabras clave: Seguidor solar; Azimut; elevación; panel solar; mecánica, ensamblaje.

Introducción

El sol es virtualmente una fuente inagotable de energía, por esto la energía solar es considerada renovable; esta energía puede ser transformada a través de procesos fototérmicos, fotoquímicos y fotovoltaicos, siendo este último el proceso de conversión de la radiación solar en corriente (Kar, 2022). En abril de 1954 Bell Telephone Company presentó al mundo la "Batería Solar", este sistema producía 50 Watts pico por metro cuadrado (Wp /m²) de celdas fotovoltaicas, donde Wp es una unidad de potencia utilizada para asociar el valor máximo de potencia que puede generar un panel fotovoltaico expuesto a condiciones específicas. Esta invención constituyó un aporte significativo para el desarrollo de este tipo de energía renovable, así como a la toma conciencia del gran daño ambiental producido por el uso continuo de combustibles para la generación de energía (Perlin, 2004). Existen dos tipos de estructuras para la instalación solar fotovoltaica y se pueden clasificar según su movimiento en estáticos y dinámicas (Pinzón, 2021). Las primeras son fijas no tienen movimiento, pero estas estructuras son robustas, flexibles, bajo costo y una larga vida útil (Güemes,2021). Son estructuras rápidas y eficientes que son las más usadas en el mercado en terrenos cuya inclinación es mayor al 5% (Zambrano,2016). las estructuras estáticas maximizan la captación de radiación solar de los paneles fotovoltaicos, cuando se inclinan el número de grados de la latitud del lugar y se orientan de manera opuesta al sentido de esta (Zamora, 2019), en el caso de Bucaramanga Colombia es de 7° y orientarse al sur, en el caso de Yuriria Guanajuato México es de 20.2 y con la misma orientación al sur. Las instalaciones solares dinámicas pueden ser seguidores de un eje de libertad como por ejemplo (Castaño,2021), en la



mayoría de los casos se realiza el movimiento de este a oeste y aumentan de un 5% a un 30% comparado con un sistema estático (Wang, 2013). También existen los seguidores solares con dos grados de libertad o dos ejes, estos le permiten al panel solar a través de una trayectoria acimutal (giro respecto al eje vertical) y giros con respecto a un eje horizontal o de elevación mientras los de 1° de libertad solo pueden realizar uno de los dos (Gönül, 2022).

En el mercado y aplicaciones como (Dandu, 2022; Angulo, 2022) se utiliza una parte mecánica que consiste en una unidad de giro de dos ejes (Dual axis slewing drive), la cual es fabricada como solución en aplicaciones de posicionamiento para paneles fotovoltaicos, platos satelitales, brazos robóticos, entre otros. Los fabricantes de estas unidades ofrecen una gama de posibilidades donde los criterios principales de selección son el torque y la velocidad de salida. Se realizaron cotizaciones con diferentes fabricantes de una unidad con un eje de salida de 3" de diámetro y dos motorreductores (engranaje planetario) de 24 VDC, la unidad de giro Unidad de giro SDE3-62MHQ, tiene un costo en el mercado de más de 1500 dólares, razón por la cual se decidió realizar el diseño y ensamblaje de la parte mecánica.

En el presente proyecto de investigación se diseñó y construyó un sistema mecánico como fase uno de un sistema de seguimiento solar, con movimiento en dos ejes, resistente a las condiciones ambientales locales, el cual soporta un panel fotovoltaico de 250 Wp y realiza los movimientos del mismo, para en una fase posterior realizar el control del movimiento del mismo, de tal forma que se lograría aumentar la generación de energía eléctrica. Es de vital importancia realiza una unidad experimental resistente a condiciones climáticas, debido a que estará expuesta al sol, viento y lluvias, El diseño y construcción de este seguidor está enfocado desde la perspectiva académica, emprendimiento y de investigación. la consecución de esta unidad experimental será de utilidad para posteriores estudios sobre seguimiento solar que involucren el control de la posición angular (acimut y altura solar) de un panel UPSOLAR 250, la monitorización y utilización de la energía producida por el panel FV con el objetivo de contribuir al análisis del comportamiento de sistemas fotovoltaicos en zonas tropicales y el de realizar una comparación de la eficiencias entre un panel con estructura estático y uno dinámico como el de la presente investigación.

Al ser una unidad experimental se pensó en que la selección de los elementos podría estar ligeramente sobredimensionada con el fin de aplicar sobre ellos nuevos trabajos con fines de investigación. Desde este punto de vista se establecen algunas ventajas con las que cuenta esta unidad: La unidad cuenta con la capacidad de movilizar un peso tres veces mayor que el peso para el cual se diseñó, indistintamente del eje de movimiento. Teniendo esto en cuenta, es posible que la estructura en su parte mecánica pueda ser modificada con el fin de adecuar mecanismos de control de movimiento mecánico, así como sensores que permitan determinar la posición del sol.

Metodología Propuesta

Panel fotovoltaico

La unidad experimental de seguimiento solar, debe soportar y mover un panel (Solardesigntool, 2023) FV Upsolar UP-M250P (Figura 2) en dos grados de libertad con el objetivo de aumentar la captación de radiación solar incidente sobre él. Este componente es un módulo compuesto por 60 celdas fotovoltaicas elaboradas a base de silicio policristalino, las principales especificaciones técnicas de este módulo FV se detallan en la Tabla 1.

En el presente proyecto de investigación se busca realizar el armado de la estructura mecánica de un seguidor solar con dos grados de libertad. La metodología de armado de la Fase I, del proyecto de investigación se puede ver en la figura 1.



Tabla 1. Especificaciones a considerar del módulo Upsolar UP-M250.

| Característica | Descripción |
|---------------------------------|--|
| Potencia máxima [Wp] | 250 |
| Voltaje a potencia máxima [V] | 30,9 |
| Corriente a potencia máxima [A] | 8,10 |
| Voltaje de circuito abierto [V] | 38,2 |
| Corriente de corto circuito [A] | 8,45 |
| Eficiencia | 15,4% |
| Rango de temperatura [°C] | -40 – 90 |
| Dimensiones [in/mm] | 64,57 x 39,06 x 1,38 / 1640 x 992 x 35 |
| Peso [lb/kg] | 40,8 / 18,5 |

Fuente: Solar, 2023.



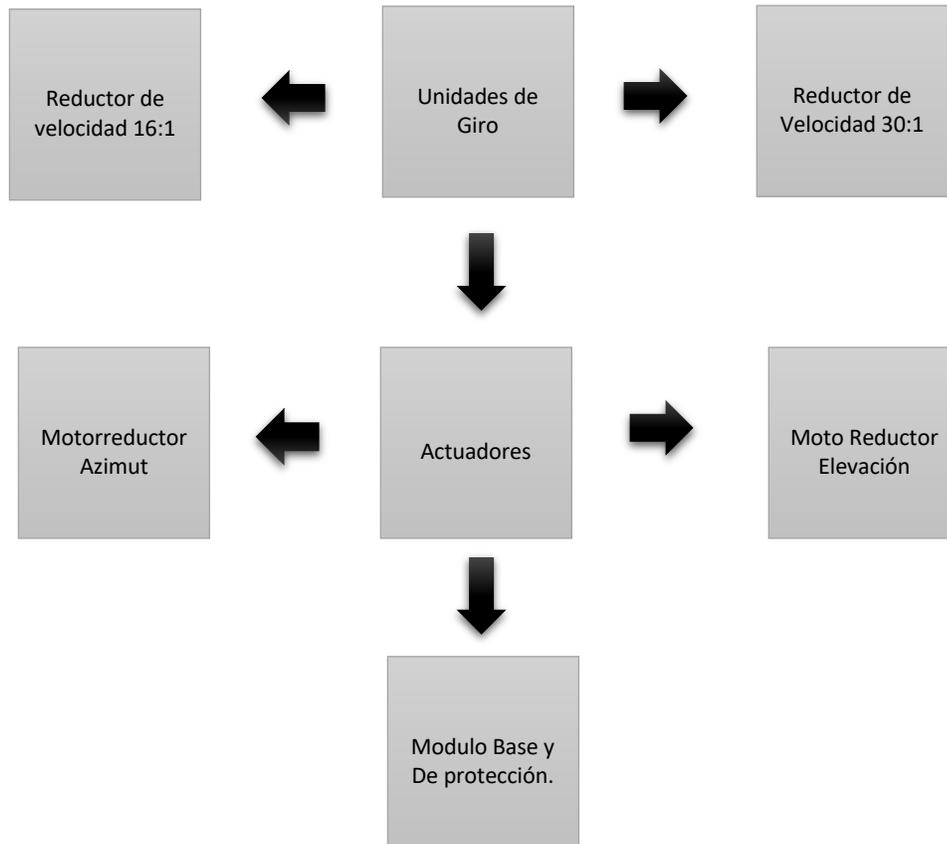


Figura 1. Metodología de investigación implementada.
Fuente: Elaboración propia

Resultados

La fase inicial del diseño se basó en la mecánica de movimiento del sistema, la adquisición o fabricación de cada elemento se plantea a partir múltiples factores, entre los cuales se destacan el peso, consumo de potencia, costo, modularidad, transporte, instalación, resistencia a la intemperie y durabilidad.

Soporte del panel

A partir de las especificaciones del panel descritas en la Tabla 1 y sus puntos de anclaje, se diseñó una estructura en forma de H a base de ángulos de hierro de 1", que permita soportar y asegurar el panel FV de forma horizontal como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Soporte de la carga (Esquema realizado en SolidWorks).
Fuente: Elaboración propia

Transmisión al eje base de soporte del panel FV

Dada la necesidad de realizar la transmisión del movimiento desde el motorreductor de altura solar al soporte del panel se hace necesario el diseño de un mecanismo de transmisión. Se contempló el uso de un sistema de poleas dentadas y un mecanismo cadena-piñón con relación de transmisión 1:1; finalmente, se seleccionó la segunda opción dado que estos mecanismos tienen una alta vida útil y son económicamente accesibles. Este sistema requirió de una base para soportar los rodamientos, y estos a su vez el eje que soportara e inclinara el panel como se observa en la Figura 3.

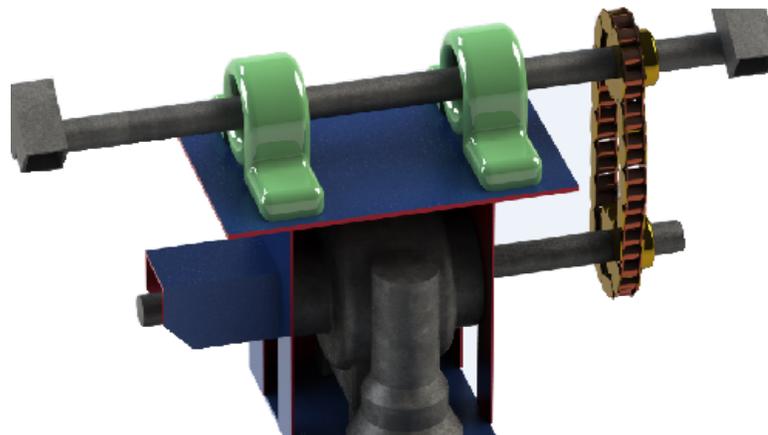


Figura 3. Transmisión de movimiento al soporte.
Fuente: Elaboración propia

Unidades de giro

Se seleccionó este tipo de reductores debido a que cuando el ángulo de acople entre la corona y el tornillo “sinfin” es cercano a 90° o existen relaciones de transformación altas se otorga a estas una capacidad de “bloqueo” al movimiento, cuando este se pretende ejercer desde su eje de salida; esta característica es vital dado que el panel fotovoltaico debe ubicarse en una posición angular y debe permanecer ahí hasta cuando se realice el siguiente ajuste posicional. Con la ausencia de este tipo de reducción sería necesario aplicar una excitación continua en los actuadores para conservar una posición. La mecánica de este tipo de reductores se muestra en la Figura 4. (Yoycart,2023).



Figura 4 Motorreductor modelo (DFS10G-05) fabricado en Japón.
Fuente: (Yoycart,2023).

Teniendo en cuenta que la potencia consumida en los sistemas de seguimiento solar depende directamente de la velocidad de los actuadores y que estos tienen una velocidad nominal de 2400 rpm a 24 V, se hace necesaria una relación de reducción de al menos 4800:1 para obtener una velocidad máxima de 0,5 rpm. Para cumplir con este requerimiento se seleccionaron dos reductores cuyas referencias y especificaciones se detallan a continuación:

Reductor de velocidad 16:1 (módulo 563001e500).

El módulo 563001e500 es utilizado por la industria automotriz (Ford, Hyundai, Mitsubishi) como columna de direcciones electrónicamente asistidas (EPS). Este posee una corona a base de teflón y un tornillo que normalmente es accionado por un motor de 12 VDC a 1600 rpm, el cual para su propósito consume una corriente promedio de 13 A, por lo cual para nuestra aplicación es solo de utilidad la caja reductora, la cual posee una relación de transformación de 16:1, este elemento se puede observar en la Figura 5.

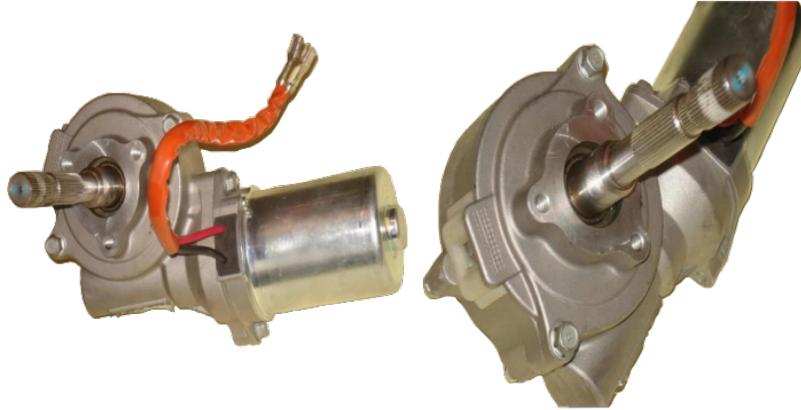


Figura 5. Reductores de velocidad de 16:1
Fuente: Elaboración propia

Reductor de velocidad con relación 30:1

La caja reductora seleccionada (Figura 6), es una caja Bonfiglioli Riduttori tipo MVF 27/N con relación 30:1, de eje de salida hueco y piñones de bronce (Bonfiglioli, 2023)



Figura 6. Reductor de velocidad 30:1
Fuente: Bonfiglioli, 2023.

Reductor de velocidad adicional.

Como se mencionó, para el movimiento acimutal se hace necesario el uso de un reductor adicional debido al daño de la caja reductora original acoplado al servo-motor. Para reemplazarla se seleccionó y acopló a este actuador una caja reductora HFC-775 (8) con relación de transformación de 100:1. Ver figura 7.



Figura 7. Reductor de velocidad reemplazo.
Fuente: Elaboración propia

Actuadores

Los actuadores representan uno de los elementos vitales en el diseño y construcción de este sistema de seguimiento solar. Debido a que previamente se ha seleccionado un diseño mecánico el cual se basa en el uso de motores, en este apartado se muestran las opciones contempladas y la selección de los mismos. Se contempló el uso del servomotor DFS-10G-05 fabricado por Japan Servo y originalmente usado en impresoras y fotocopiadoras láser de referencias HP2686A y HP2686D. Este actuador está compuesto por un servomotor y una caja reductora que disminuye su velocidad y aumenta su torque con una alta eficiencia. A continuación, en la tabla 2, se pueden observar las principales características del servo-motorreductor.

Tabla 2. Características del servo-motorreductor DFS10G-05.

| Características nominales del servo-motorreductor DFS10G-05 | |
|---|-------------------------------------|
| Característica | Descripción |
| Potencia nominal [W] | 13 |
| Voltaje nominal [V] | 24 |
| Corriente maxima [A] | 0,54 |
| Relación de reducción | 1:25 |
| Velocidad de motor [rpm] | 2400 |
| Velocidad de salida [rpm] | 96 |
| Masa [kg] | 1,4 |
| Torque [Nm] | 10 Nm |
| Encoder | 48 ppr (Señal senoidal diferencial) |

Fuente: Sánchez, 2020.

Ventajas y desventajas del Motorreductor (DFS10G-05)

Se tienen ciertas ventajas y desventajas de motorreductor los cuales son: Este servo-motorreductor posee un consumo de potencia bajo, su caja reductora le otorga baja velocidad a la salida y un aumento proporcional del torque, su precio en el mercado es bajo en comparación con Parvalux (PM50GWS) que su costo es de 300 dólares aproximadamente, y puede encontrarse (usado) en el mercado local por un precio aproximado de \$12 o importarlo desde Asia con un costo de \$10 (No incluye gastos de envío). Posee un *encoder* en motor 48 *ppr*, el cual emite una señal senoidal diferencial la cual puede resultar de gran utilidad para realizar un sistema de control de posición. Se puede ver el motorreductor en la figura 8.



Figura 8. Motorreductor modelo (DFS10G-05) fabricado en Japón.
Fuente: Elaboración propia

Módulo base y protección

Este módulo se diseñó a partir de un esqueleto en forma de cubo el cual almacena en su interior el módulo encargado del movimiento acimutal y el circuito de control, razón por la cual debe estar debidamente cubierta. Cuenta con una puerta de acceso frontal y celosías de ventilación ubicadas en las vistas laterales, con el fin de permitir la ventilación y el flujo de aire en su interior tal como se aprecia en la Figura 9.



Figura 9. Soporte de la carga (Esquema realizado en SolidWorks).
Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene por medio de SolidWorks el proceso frontal de la estructura mecánica del seguidor solar de dos grados de libertad. Ver figura 10.

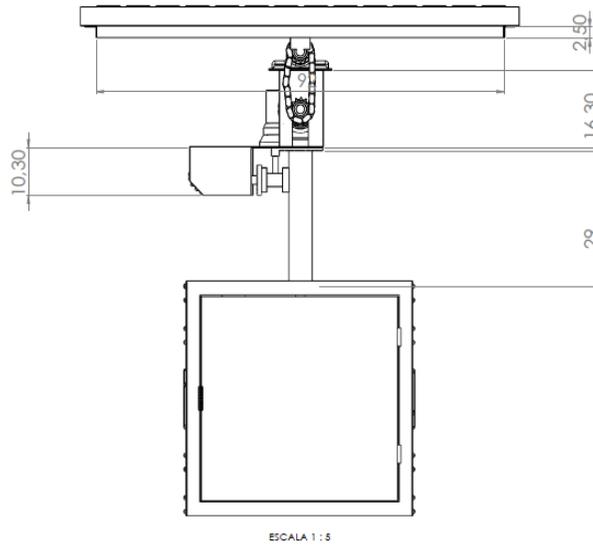


Figura 10. Vista frontal general de la estructura (SolidWorks).
Fuente: Elaboración propia

La parte mecánica de la unidad experimental, tiene como partes principales, panel, acentuadores ejes de transmisión del eje, unidades de giro y modulo base para la fabricación de acoples en bronce y acero inoxidable que permitieran la correcta unión y transmisión de movimientos entre los actuadores y las cajas reductoras seleccionadas. Posteriormente se realizaron los cortes y la soldadura de acero estructural en L para la construcción del soporte del panel y el módulo base. Para el módulo base se recortaron de 4 platinas de acero (4 mm de espesor), con el objetivo de proteger el interior del módulo de la intemperie; a dos de estas platinas (vistas laterales) se les realizaron cortes (celosías) para permitir el flujo de aire dentro de la caja. Para transmitir el movimiento desde el servo-motorreductor de altura solar al soporte del panel se construyó una base con platinas de acero (7 mm de espesor), a la cual se atornillaron dos rodamientos que brindan rotación al eje, el cual fue fresado en sus puntas para permitir que el soporte del panel descansa sobre él. Entre este eje y el eje de salida del motorreductor de altura solar se acoplo un sistema de transmisión cadena-piñón con relación 1:1. Finalmente se realizó un proceso de lijado, para remover corrosión y suciedades, se aplicaron dos capas de pintura anticorrosiva y dos de pintura negra. Los resultados de las medidas de las unidades ensambladas se pueden ver a continuación en la figura 11. Se obtienen los siguientes resultados previos en la unidad experimental de seguimiento solar con dos grados de libertad.

Unidad experimental mecánica terminada: Se tiene la unidad de seguimiento solar terminada en su parte mecánica instalada en el 5to piso de la escuela de eléctrica, electrónica y telecomunicaciones de la universidad industrial de Santander. Ver figura 12.



Figura 11. Seguidor Solar ensamblado.
Fuente: Elaboración propia



Figura 12. Seguidor Solar en su parte mecánica culminado y con el panel solar instalado.
Fuente: Elaboración propia

Conclusiones



Se logró diseñar, implementar e instalar la parte mecánica de una unidad experimental de seguimiento solar con dos grados de libertad con el fin de movilizar un panel FV UPSOLAR 250, lo que permitiría captar una mayor cantidad de energía. La parte mecánica de la unidad experimental de seguimiento solar que se implementó cuenta con algunas observaciones las cuales se establecen a partir de que se da por terminada su elaboración, estas observaciones son: Se manejaron tres aspectos predominantes en la selección de los motores y/o motorreductores encargados de generar los dos movimientos, el primero de ellos fue que estos motores tuviesen un bajo consumo de potencia eléctrica en operación, el segundo fue que en condiciones de operación tuviesen el par requerido para garantizar los movimientos y el tercero fue que estos deberían tener un mecanismo de sensado incorporado para controlar su velocidad y de esta manera lograr controlar la posición del panel FV.

El diseño y construcción de este seguidor se enfocó teniendo en cuenta una perspectiva académica y de un futuro emprendimiento, debido al bajo costo en su elaboración que no supera los 200 dólares, cuyos resultados serán de utilidad para posteriores estudios que conlleven a la determinación de la mejor estrategia de seguimiento solar, la mejora porcentual de la eficiencia de este sistema con respecto a estructuras estáticas, así como el desarrollo de investigaciones sobre el comportamiento de paneles fotovoltaicos en un entorno tropical

Referencias

- Angulo-Calderón, M., Salgado-Tránsito, I., Trejo-Zúñiga, I., Paredes-Orta, C., Kesthkar, S., & Díaz-Ponce, A. (2022). Development and Accuracy Assessment of a High-Precision Dual-Axis Pre-Commercial Solar Tracker for Concentrating Photovoltaic Modules. *Applied Sciences*, 12(5), 2625. DOI:<https://doi.org/10.3390/app12052625>
- Bonfiglioli. (s.f.). BR_CAT_VF-W_IE2-IE3_SPA_R07_2_1.pdf. Recuperado el 26 de mayo de 2023, de https://www.bonfiglioli.com/BR_CAT_VF-W_IE2-IE3_SPA_R07_2_1.pdf.
- Castaño-Gómez, M., & García-Rendón, J. J. (2020). Análisis de los incentivos económicos en la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Colombia. *Lecturas de economía*, (93), 23-64. DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.le.n93a338727>
- Catota Sánchez, A. V., & Simbaña Simbaña, J. E. (2020). *Diseño de un colector térmico mediante concentración parabólica de seguimiento solar en dos ejes* (Bachelor's thesis). Doi: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19112>
- Dandu, S. C. R., & Sarla, A. (2022). Sun Tracking System. DOI: urn:nbn:se:bth-23262
- Del mar Pinzón, I., Rojas Pérez, A., Vega Correa, J. M., & Castañeda Rincón, O. H. (2021). Estudio de factibilidad para creación de una empresa que suministre e instale equipos de energía solar fotovoltaica en el departamento de Cundinamarca (Doctoral dissertation, Corporación Universitaria Minuto de Dios). DOI: <https://hdl.handle.net/10656/13295>
- Gönül, Ö., Yazar, F., Duman, A. C., & Güler, Ö. (2022). A comparative techno-economic assessment of manually adjustable tilt mechanisms and automatic solar trackers for behind-the-meter PV applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112770. DOI:10.1016/j.rser.2022.112770
- Güemes, A., Fajardo, P., & Raiola, M. (2021). Experimental assessment of RANS models for wind load estimation over solar-panel arrays. *Applied Sciences*, 11(6), 2496. DOI:<https://doi.org/10.3390/app11062496>
- Kar, P. C., Islam, M. A., Chakraborti, J., & Sutradhar, S. (2021). Mathematical Performance Analysis of the Absorbing Sun Light for Rotating and Non-rotating solar cell panel. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 100(10). Doi: https://www.researchgate.net/profile/Pankaj-Kar-2/publication/357237712_MATHEMATICAL_PERFORMANCE_ANALYSIS_OF_THE_ABSORBING_SUN_LIGHT_FOR_ROTATING_AND_NONROTATING_SOLAR_CELL_PANEL/links/61c27fe5c99c4b37eb147ced/MATHEMATICAL-PERFORMANCE-ANALYSIS-OF-THE-ABSORBING-SUN-LIGHT-FOR-ROTATING-AND-NON-ROTATING-SOLAR-CELL-PANEL.pdf
- PERLIN, John. Silicon solar cell turns 50. National Renewable Energy Lab., Golden, CO. (US), 2004. DOI: <https://www.osti.gov/biblio/15009471>



- Solar designtool. (s.f.). Upsolar UP-M250P. Recuperado el 26 de mayo de 2023, de <http://www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/Upsolar/3102/UP-M250P/specification-data-sheet.html>.
- Wang, J. M., & Lu, C. L. (2013). Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system. *Sensors*, 13(3), 3157-3168. DOI: 10.3390/s130303157
- Yoycart. (s.f.). Yoycart. Recuperado el 26 de mayo de 2023, de <https://www.yoycart.com/Product/12996671366/>
- Zambrano Paredes, D. S. (2016). Análisis de la radiación no ionizante (RNI) por parte de radio base celulares en sectores de la ciudad de Guayaquil. DOI: <https://repositorio.ug.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d0f87c37-a67f-4b4f-ac9a-227f4fd655a3/content>
- Zamora Pilatuña, J. C., & Arias Ricaurte, P. A. (2019). *Diseño y simulación de una compuerta plana para apertura y cierre automático alimentada con energía solar* (Bachelor's thesis). DOI: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17727>

