

Un análisis bibliométrico de la investigación de sistemas de seguimiento solar

A bibliometric analysis of solar tracking systems research

Rafael E. Pineda Arrieta¹, Guillermo E. Valencia Ochoa², Javier Roldán Mckinley³

¹Estudiante de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía Kaí, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia

²M.Sc. Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía Kaí, Universidad del Atlántico. Barranquilla, Colombia

³Ph.D. Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación DIMER, Universidad del Atlántico. Barranquilla, Colombia
Email: rpineda@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido: 19/07/2018

Aceptado: 28/07/2018

Cite this article as: R. E. Pineda Arrieta, G. E. Valencia Ochoa, J. Roldán Mckinley, "A bibliometric analysis of solar tracking systems research", *Prospectiva*, Vol 16, N° 2, 35-48, 2018.

RESUMEN

Un total de 131 publicaciones de investigación sobre los sistemas de seguimiento solar de 2007 a 2017 se identificaron a partir de los datos alojados en la versión en línea de SCI-Expanded, Thomson Reuters Web of Science, para el análisis bibliométrico. El análisis incluyó el resultado de la publicación, la distribución de palabras clave, revistas y el desempeño de países, instituciones y autores. También se informan las tendencias de citas y las publicaciones altamente citadas. Se encontró que el resultado de la publicación de documentos relacionados aumentó a lo largo de todo el período de estudio. Los resultados mostraron que "solar", "tracking" y "system" fueron los términos más frecuentes en los títulos de publicación. La institución más productiva fue la Universidad de King Abdulaziz ubicada en Arabia Saudita, además se contó con la participación de 202 instituciones, lo que demuestra un gran interés investigativo a nivel mundial. Se encontró que los artículos se volvieron cada vez más colaborativos con un mayor número de autores y referencias bibliográficas. Los países más influyentes en este campo investigativo fueron Estados Unidos y China sumando entre ambos el 27,48% de las publicaciones totales.

Palabras clave: Revisión bibliométrica; Seguimiento solar; Publicaciones; Energía solar.

ABSTRACT

A total of 131 research publications on solar tracking systems were identified in the 2007-2017 period, from the data hosted in the online version of SCI-Expanded, Thomson Reuters Web of Science, for bibliometric analysis. The analysis included the publication results, the keywords distribution, the journals, and the performance of countries, institutions, and authors. Citing trends and highly cited publications are also reported. It was found that the result of the publication of related documents increased throughout the study period. The results showed that "solar", "tracking" and "system" were the most frequent terms in the publication titles. The most productive institution was the King Abdulaziz University in Saudi Arabia, in addition to the participation of 202 institutions, which shows a great research interest worldwide. It was found that the articles became more collaborative with a greater number of authors and bibliographic references. The most influential countries in this research field were the United States and China, which together accounted for 27,48% of total publications.

Keywords: Bibliometric review; Solar tracking; Publications; Solar energy.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología solar fotovoltaica se ha convertido en un recurso de gran importancia para la producción de energía renovable, por ser más amigables con el medio ambiente y más sostenibles en comparación con los combustibles fósiles [1, 2]. En el campo de las energías renovables, la energía solar ha tomado un mayor interés investigativo respecto a los demás campos [3]. Se han venido desarrollando tecnologías que permitan aumentar la cantidad de energía solar recogida, aplicando técnicas de seguimiento solar y la optimización del ángulo de inclinación para lograr obtener la mayor parte de la radiación solar disponible [4, 5].

La máxima eficiencia de los sistemas fotovoltaicos se puede lograr si el panel se mantiene perpendicular a la dirección de las radiaciones del sol, por tanto, el seguimiento de la posición del sol con precisión es extremadamente importante [6]. En particular, las investigaciones sobre los sistemas de seguimiento solar, atrae el interés de los investigadores de todo el mundo, revelando que se mejora la captura global de energía para un área determinada en un 30-50% frente a los módulos con una inclinación fija [7].

La producción de investigaciones encaminadas a los sistemas de seguimiento solar, ha llevado al desarrollo de mecanismos capaces de controlar el movimiento de forma eficiente, como el uso de actuadores de hidruro metálico [8], motores incorporados en el panel con rastreadores LDR para identificar la dirección del movimiento del sol [9], e incluso la deducción de ecuaciones analíticas para describir el movimiento de los sistemas [10]. Las revisiones bibliométricas proporcionan la integración de datos usados para el estudio de los sistemas de seguimiento solar, los cuales se basan en el examen estadístico cuantitativo de las tendencias de las publicaciones, anclado en grupos de palabras y la distribución de términos en títulos de artículos y palabras clave, entre otros indicadores [9].

Este trabajo fue diseñado para examinar las investigaciones referentes a los sistemas de seguimiento solar durante los años 2007 a 2017. Los datos para la investigación bibliométrica fueron filtrados de Web of Science Core Collection y estudiados en HistCite. Se analizaron las tendencias en la productividad de la investigación, las contribuciones de los autores y los países más influyentes. Los resultados proporcionan información sobre las tendencias de investigaciones existentes, los cuales podrían ayudar a los investigadores a discernir sobre la dirección de la ciencia en la investigación sobre los sistemas de seguimiento solar.

2. METODOLOGÍA

Los datos para el análisis fueron extraídos de la versión en línea de SCI-Expanded, en Thomson Reuters

Web of Science. Los términos “solar tracking”, “solar tracker”, “solar tracking mechanism”, “sun tracking” y “sun tracker” se buscaron en términos de tema (incluidas 3 partes: título, resumen y palabras clave de los autores) dentro de los años de publicación que van de 2007 a 2017. Se usó el software HistCite para procesar y clasificar los datos por archivos, autores, revistas, tipo de documento, idioma, institución y país. El software también proporciona histogramas de un rango de artículos, organizados de forma cronológica que representan los trabajos más citados. Los datos proporcionados fueron tabulados y graficados con la herramienta Origin, permitiendo estudiar el número de artículos publicados y las citas por artículo por año, permitiendo analizar las tendencias e importancia que toman las investigaciones sobre los sistemas de seguimiento solar en los últimos años. De igual forma se estudió la influencia que tienen algunos artículos desde la fecha de publicación hasta 2017, por medio de gráficas que esquematizan el incremento o decremento de las citas por artículo. Los artículos con $TC \geq 20$ se seleccionaron como artículos más citados en las investigaciones sobre sistemas de seguimiento solar durante este período. A continuación, se recopilaron y analizaron los datos en estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron todos los artículos publicados en la investigación sobre sistemas de seguimiento solar durante los años 2007 a 2017. Los parámetros analizados incluyeron: tipo de documento; lenguaje de publicación; volumen y características del resultado de la publicación; categorías de temas; publicaciones publicadas por revistas; y el desempeño de los países. También se analizaron los patrones de citas y palabras en el título.

3.1 Principales tipos de documentos

Se encontraron un total de 131 documentos. El tipo de documento más común fue el artículo de investigación (92,37% de los 131 documentos), seguido de documentos de revisión (4,58%), documentos de procedimientos (1,53%), una corrección y un nuevo artículo. Se analizaron los datos de citas para diferentes tipos de documentos (tabla 1). Dentro de los tipos de documentos se obtuvo una relación consistente entre las citas totales con la salida de publicaciones totales. Esto muestra que un mayor número de publicaciones en un tipo de documento particular dio lugar a una mayor probabilidad de citación dentro de ese tipo de documento. No fue sorprendente que las revisiones tuvieran citas por artículo más altas que los artículos de investigación, debido a que presentan información a los lectores de una manera más integrada, lo que ayuda a obtener una perspectiva más amplia en comparación con otros tipos de documentos primarios. Por esta razón, las revisiones reciben más citas que los artículos.

Tabla 1. Distribución de investigaciones de sistemas de seguimiento solar por tipos de publicaciones entre 2007 y 2017.

Table 1. Distribution of sun tracking system researches by document types of publications between 2007 and 2017.

Tipo de documento	TP	%	TC	CPP
Artículo	121	92,37	800	6,61
Revisión	6	4,58	44	7,33
Artículo, documento de procedimientos	2	1,53	2	1,00
Corrección	1	0,76	0	0,00
Artículo periodístico	1	0,76	0	0,00

TP: total artículos; TC: número de citas totales; CPP: citas por publicación.

3.2 Característica de los artículos

Como se muestra en la tabla 2, la investigación sobre los mecanismos de seguimiento solar se ha intensificado a lo largo de los años, con interesantes aumentos del número de publicaciones, pasando de 2 artículos en 2007 a 33 artículos en 2017. El número de autores por artículos también tuvo un incremento, lo que resalta una mayor cooperación al pasar de los años; al inicio, en promedio para los primeros años (2007 - 2012) el número medio de autores por artículo fue de 3,7 pasando a 4,4 para el rango de años entre 2013 - 2017. De igual forma es posible analizar el número medio de citas referenciadas por artículo (NR), obteniendo, para un rango de años que va de 2007 a 2012 un promedio de NR de 25,4 por cada artículo publicado. Luego, para el intervalo de 2013 a 2017, en promedio el NR aumenta a 27,2.

Tabla 2. Características de los artículos científicos de sistemas de seguimiento solar entre 2007 y 2017.

Table 2. Characteristics of solar tracking systems scientific articles between 2007 and 2017.

AÑO	TP	AU	AU/TP	NR	NR/TP
2007	2	8	4,0	57	28,5
2009	5	15	3,0	116	23,2
2010	5	18	3,6	135	27,0
2011	10	36	3,6	322	32,2
2012	9	39	4,3	138	15,3
2013	12	36	3,0	269	22,4
2014	10	39	3,9	244	24,4
2015	18	80	4,4	422	23,4
2016	25	156	6,2	801	32,0
2017	33	140	4,2	1107	33,5

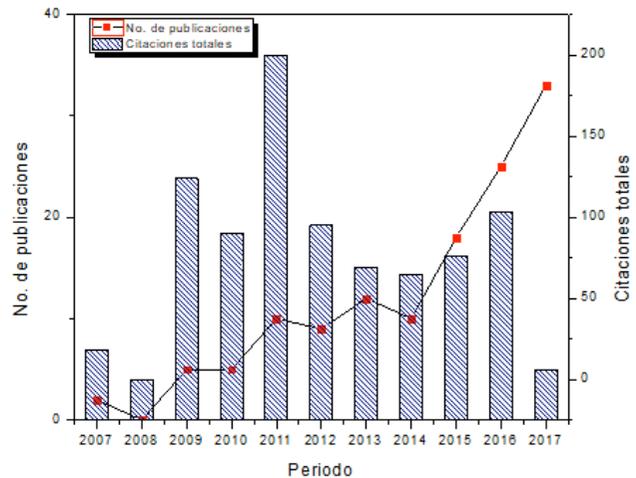
TP: total artículos; AU: número de autores; NR: número de referencias citadas.

3.3 Salida de publicaciones y citas por año

Se analizaron las tendencias en la distribución de artículos de investigación por año de publicación (figura 1). La producción anual de artículos de investigación tuvo un aumento progresivo con los años, pasando de 2 artículos en 2007 a 10 en 2011, a partir de esta fecha y hasta 2014 no hubo un aumento considerable.

Las publicaciones desde 2014 a 2017 aumentaron considerablemente más rápido en comparación a los años anteriores. La expansión observada en la producción de investigación reflejó que hubo un mayor interés por parte de los investigadores para el estudio de los sistemas de seguimiento solar. El desarrollo tecnológico pudo ser un factor que impulsó la producción de documentos referentes a esta temática. De igual forma, debido a que la energía solar tiene la mayor densidad de potencia y el mayor potencial biofísico entre las energías renovables, busca sustituir el uso de combustibles fósiles, lo que influyó en la investigación de sistemas más eficientes para la transformación de este tipo de energía, lo cual incrementó las publicaciones hasta 2017 [2, 11].

Figura 1. Número de artículos y citas por artículo por año.
Figure 1. Number of articles and citations per articles by year.



3.4 Enfoque de las investigaciones sobre los sistemas de seguimiento solar

Un análisis estadístico donde se estudia la frecuencia de los términos clave en los títulos de los artículos, indica la dirección que toma la ciencia y proporciona detalles del progreso en la investigación de sistemas de seguimiento solar. La distribución de palabras de título y palabras clave de los autores en diferentes periodos se puede utilizar para determinar el enfoque de investigación.

Las palabras más predominantes en los títulos de los documentos siguen los objetivos de estudio en este análisis bibliométrico acerca de los sistemas de seguimiento solar. Las 10 palabras principales más frecuentes fueron: "solar" (106, 80,9% de 131 artículos), "tracking" (89; 67,9%), "system" (46, 35,1%), "axis" (42; 32,1%), "tracker" (42, 32,1%), "photovoltaic" (26; 19,8%), "dual" (24; 18,3%), "design" (23, 17,6%), "sun" (23; 17,6%) y "based" (21; 16%). El análisis de igual forma reveló 21 palabras clave de los autores que aparecieron en al menos 4 artículos. Los 10 términos más

frecuentes en las KeyWords fueron: ‘design’ (34; 26%), seguida de ‘system’ (30; 22,9%), ‘sun tracking’ (22; 16,8%), ‘solar tracker’ (18; 13,7%), ‘performance’ (15; 11,5%), ‘sun tracker’ (10; 7,6%), ‘pv system’ (9; 6,9%), ‘energy’ (9; 6,9%), ‘solar energy’ (9; 6,9%) y ‘photovoltaic system’ (8; 6,1%).

3.5 Desempeño de las instituciones de investigación, revistas de publicación y países

Las instituciones de 36 países participaron en la investigación de los sistemas de seguimiento solar durante el período 2007-2017. En los datos estudiados se obtuvo que no hubo instituciones con un número de publicaciones de más de 4 artículos, sin embargo, se contó con la participación de 202 instituciones con al menos 1 artículo de publicación. Lo cual indica que la temática estudiada es de interés mundial con un gran número de instituciones apoyando este campo investigativo.

La Universidad de King Abdulaziz (3,1% de los 131 artículos) fue la institución con más publicaciones, seguida por la Universidad de Firat, Natl Tech University Athens, La Universidad de Catania, Universidad de Jaén, Universidad Pública de Navarra, Universidad Putra Malaysia y la Universidad VIT, todas con un 2,3% de los 131 artículos.

Como se muestra en la tabla 3, la mayoría de los artículos fueron publicados en revista con un perfil energético. Las 5 principales revistas fueron Solar Energy con un 11,45% de los artículos, Renewable Energy con 6,87%, Atmospheric Measurement Techniques, Energy Conversion and Management, y Renewable & Sustainable Energy Reviews, las últimas 3 revistas con un 3,05% de los artículos.

Tabla 3. Las 5 mejores revistas en investigación de sistemas de seguimiento solar durante el período 2007-2017.

Table 3. Top 5 journals in solar tracking systems research during the period 2007-2017.

Journal	TP	%
Solar Energy	15	11,45
Renewable Energy	9	6,87
Atmospheric Measurement Techniques	4	3,05
Energy Conversion and Management	4	3,05
Renewable & Sustainable Energy Reviews	4	3,05

Los 10 países más productivos en la investigación de sistemas de seguimiento solar durante este período se enumeran en la tabla 4, con información sobre el número de documentos producidos por cada país, el porcentaje respecto al total de artículos y el número de citas totales. Las investigaciones sobre los sistemas de seguimiento solar estuvieron lideradas principalmente por Estados Unidos con un total de 21

publicaciones (16,03% de los 131 artículos); seguida por China 15 documentos (11,45%); España y Taiwán con 13 (9,92%); Italia 10 (7,63%); India 8 (6,11%); Malasia, Arabia Saudita, y Turquía, todas con 6 publicaciones (4,58%); y finalmente Alemania con 5 documentos (3,82%). Entre los países con las publicaciones más citadas se encuentran Estados Unidos, España y Taiwán.

Tabla 4. Los 5 mejores países con más de 10 artículos.
Table 4. Top 5 countries with more than 10 articles.

País	TP	TP (%)	TC
Usa	21	16,03	221
China	15	11,45	21
España	13	9,92	105
Taiwán	13	9,92	115
Italia	10	7,63	73
India	8	6,11	5
Malasia	6	4,58	7
Arabia saudita	6	4,58	15
Turquía	6	4,58	16
Alemania	5	3,82	36

3.6 La visibilidad del artículo y las tendencias de citas

Para evaluar la visibilidad de los artículos de investigación, se utilizó la cantidad de veces que se citó un artículo desde la publicación hasta finales de 2017 como indicador. Las preferencias de los lectores y el impacto científico de los trabajos publicados se estudiaron mediante el análisis de las 14 publicaciones más citadas en investigación sobre los sistemas de seguimiento solar, desde 2007 a 2017. La lista de los artículos más citados (TC ≥ 20) se muestra en la tabla 5. Los 14 artículos más citados enfocaron sus investigaciones en distintos sistemas de seguimiento solar, como los mecanismos mono ejes, doble ejes o triple ejes, investigan sobre los efectos del acimut y los ángulos de inclinación para mejorar la potencia de salida de un módulo fotovoltaico [12]. Simulación de prototipo virtual del sistema de seguimiento utilizado para mejorar la eficiencia energética de un panel fotovoltaico y comparaciones con datos experimentales [13]. Sistema de seguimiento solar de alta precisión controlado por cámara para espectrómetro Infrarrojo de Transformada de Fourier (FTIR) [14]. Modelado de sistemas de seguimiento solar usando herramientas como MATLAB/Simulink [15]. El mejoramiento de la producción de energía para condiciones nubosas a través de la inclinación de un módulo solar lejos del cenit, lo que reduce la irradiancia aumentando la captura de energía solar en casi un 50%, e incluso, la implementación de estructuras de Kirigami, motivando las investigaciones de dispositivos optoelectrónicos y mecánicos para la producción de energía de forma más eficiente [7, 16].

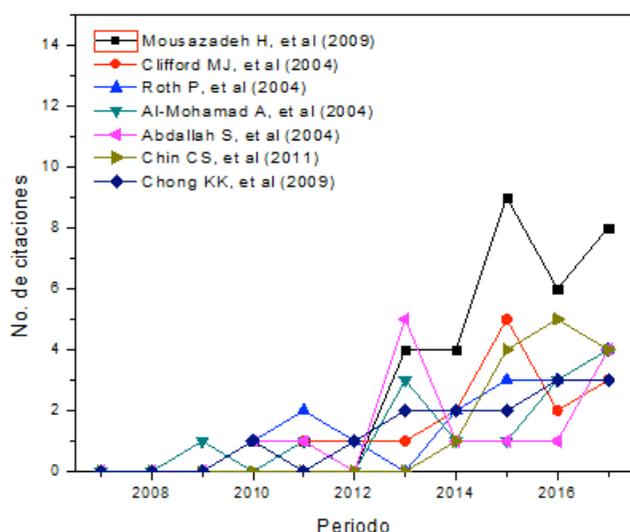
Tabla 5. Los 14 artículos con $TC \geq 20$.
Table 5. Top 14 articles with $TC \geq 20$.

Clasificación (TC)	Título del artículo	Referencia
1(56)	Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system	Kelly y col. (2009)
2(50)	Output energy of a photovoltaic module mounted on a single-axis tracking system	Chang (2009)
3(38)	Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking	Lamoureux y col. (2015)
4(35)	Soiling and other optical losses in solar-tracking PV plants in Navarra	Garcia y col. (2011)
5(32)	Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink	Chin y col. (2011)
5(35)	Two-axis solar tracking accomplished through small lateral translations	Hallas y col. (2012)
7(31)	Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel	Alexandru y col. (2010)
8(30)	A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies	Yao y col. (2014)
9(29)	Analysis of global and regional CO burdens measured from space between 2000 and 2009 and validated by ground-based solar tracking spectrometers	Yurganov y col. (2010)
10(27)	Camtracker: a new camera controlled high precision solar tracker system for FTIR-spectrometers	Gisi y col. (2011)
11(26)	Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker	Huang y col. (2011)
12(26)	Performance modeling and investigation of fixed, single and dual-axis tracking photovoltaic panel in Monastir city, Tunisia	Maatallah y col. (2011)
13(23)	Performance Analysis of a Single-Axis Tracking PV System	Dolara y col. (2012)
14(20)	Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions	Eldin y col. (2016)

Desde otra perspectiva se pueden analizar las tendencias del número de citas por año para los artículos más citados. La figura 2 muestra como fue el aumento progresivo de la visibilidad de los artículos desde 2007 hasta 2017, observando que a partir del año 2012 hubo un rápido aumento del número de citas de artículos relacionados con los sistemas de seguimiento solar. Este aumento pudo ser impulsado por el desarrollo de campañas que han sido promovidas por el Consejo Mundial De Energía (CME) y acciones gubernamentales que promueven la investigación e implementación de energías renovables. Se espera que la tendencia se mantenga creciente con el paso de los años y que se fortalezcan las investigaciones referentes al uso eficiente de la energía y más específicamente a los sistemas de seguimiento solar.

Figura 2. Tendencia de la visibilidad de las publicaciones referentes a seguimiento solar, 2007-2017.

Figure 2. Visibility trend for solar tracking related publications, 2007-2017.



4. CONCLUSIONES

Se presentó una reseña de la investigación sobre los sistemas de seguimiento solar durante el período 2007-2017 con respecto a los resultados de publicaciones anuales, las categorías temáticas de Web of Science, las áreas de investigación, las revistas, las instituciones, los países y tendencias de las investigaciones. El resultado de la publicación en este campo aumentó en gran medida durante todo el período de estudio. Por lo tanto, se ha aducido que la investigación sobre los sistemas de seguimiento solar es un campo de estudio en desarrollo. Estados Unidos y China han sido los países más productivos con un mayor impulso de las investigaciones referentes a los sistemas de seguimiento solar durante el periodo en estudio. Los resultados presentan a la universidad de King Abdulaziz como la institución más productiva.

La participación de 202 instituciones a nivel mundial revela el gran interés y aporte investigativo al estudio de la aplicabilidad y mejoras en la eficiencia de sistemas de energía renovables enfocados en los mecanismos de seguimiento solar. Solar Energy fue la revista que publicó el mayor número de artículos de investigación sobre los sistemas de seguimiento solar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigaciones, Extensión y Proyección Social de la Universidad del Atlántico por el apoyo y soportes brindados para esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] N. AL-Rousan, N. A. M. Isa, M. K. M. Desa, "Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2548–2569, 2018.
- [2] H. Borhanazad, S. Mekhilef, R. Saidur, G. Boroumandjazi, "Potential application of renewable energy for rural electrification in Malaysia", *Renewable Energy*, 59, 210–219, 2013.
- [3] G. Mao, X. Liu, H. Du, J. Zuo, L. Wang, "Way forward for alternative energy research: A bibliometric analysis during 1994–2013", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 276–286, 2015.
- [4] G. M. Masters, *Renewable and efficient electric power systems*. United States: John Wiley Sons, 2013.
- [5] L. Shi, M. Y. L. Chew, "A review on sustainable design of renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 192–207, 2012.
- [6] R. Singh, S. Kumar, A. Gehlot, R. Pachauri, "An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(3), 3263–3278, 2018.
- [7] N. A. Kelly, T. L. Gibson, "Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system", *Solar Energy*, 83(11), 2092–2102, 2009.
- [8] S. Obara, K. Matsumura, S. Aizawa, H. Kobayashi, Y. Hamada, T. Suda, "Development of a solar tracking system of a nonelectric power source by using a metal hydride actuator", *Sol Energy*, 158, 1016–1025, 2017.
- [9] A. F. de Paulo, G. S. Porto, "Solar energy technologies and open innovation: A study based on bibliometric and social network analysis", *Energy Policy*, 108, 228–238, 2017.
- [10] L. M. Fernández-Ahumada, F. J. Casares, J. Ramírez-Faz, R. López-Luque, "Mathematical study of the movement of solar tracking systems based on rational models", *Sol Energy*, 150, 20–29, 2017.
- [11] I. Capellán-Pérez, C. de Castro, I. Arto, "Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: Land requirements under 100% solar energy scenarios", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 760–782, 2017.
- [12] T. P. Chang, "Output energy of a photovoltaic module mounted on a single-axis tracking system", *Applied Energy*, 86(10), 2071–2078, 2009.
- [13] C. Alexandru, C. Pozna, "Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel", *The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 224(6), 797–811, 2010.
- [14] M. Gisi, F. Hase, S. Dohe, T. Blumenstock, "Camtracker: a new camera controlled high precision solar tracker system for FTIR-spectrometers", *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 47–54, 2011.
- [15] C. S. Chin, A. Babu, W. McBride, "Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink", *Renewable Energy*, 36(11), 3075–3090, 2011.
- [16] A. Lamoureux, K. Lee, M. Shlian, S. R. Forrest, M. Shtein, "Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking", *Nature Communications*, 6, 1–6, 2015.