

Diseño de un sistema fotomecánico inteligente con dos grados de libertad para la orientación de un panel fotovoltaico que optimice la producción de energía eléctrica

Design of an intelligent photomechanical system with two degrees of freedom for the orientation of a photovoltaic panel for optimize the production of electrical energy

LÓPEZ-XELO, Hilario†*, HERNÁNDEZ-MEDINA, José Juan y ROMANO-RODRÍGUEZ, Ma. Natividad

ID 1^{er} Autor: *Hilario, López-Xelo* / ORC ID: 0000-0001-6597-6598, CVU CONACYT ID: 732365

ID 1^{er} Coautor: *José Juan, Hernández-Medina* / ORC ID: 0000-0003-4625-2660, CVU CONACYT ID: 5227576

ID 2^{do} Coautor: *Ma. Natividad, Romano-Rodríguez* / ORC ID: 0000-0002-3415-8629, CVU CONACYT ID: 640296

Recibido Mayo 27, 2018; Aceptado Junio 30, 2018

Resumen

En la actualidad existe la imperiosa necesidad de optar por fuentes alternativas de energía a fin de lograr aminorar el impacto negativo de las actividades humanas en el medio ambiente. Una de estas fuentes lo constituyen los paneles solares fotovoltaicos. En este sentido, para que un panel solar produzca de forma óptima energía eléctrica debe estar orientado siempre de manera perpendicular al sol. La mayoría de los paneles instalados no tienen movilidad y están fijos orientados en una sola dirección, lo que ocasiona que solo produzcan energía eléctrica de manera óptima durante un muy breve periodo de tiempo. Ya existen metodologías y dispositivos para orientarlos, pero son caros y no siempre disponibles. En este sentido, lo que se busca en este proyecto, es que se aproveche la tecnología disponible en nuestro medio, de manera económica, así como un control difuso para el seguidor fotomecánico, que permita sincronizar el movimiento aparente del sol y tener un desempeño óptimo sin usar recursos complejos o caros. Este proyecto es bioinspirado en el vegetal "Helianthus Annuus" que presenta heliotropismo para optimizar la fotosíntesis (también llamado girasol, calom, jáquima, maravilla, tlapololote, maíz de teja o acahual).

Energías Alternativas, Sistema Inteligente, Seguidor Solar

Abstract

Nowadays, there is an urgent need to opt for alternative sources of energy in order to reduce the negative impact of human activities on the environment. One of these sources is the photovoltaic solar panels. Accordingly, for a solar panel to optimally produce electrical energy, it must always be oriented perpendicular to the sun. The majority of the installed panels do not have mobility and are fixed, ever oriented in a single direction, which causes that they only produce electrical energy in an optimal way during a very short period of time. There are already methodologies and devices to guide them, but they are expensive and not always available. In this sense, what is sought in this project, is to take advantage of the technology available in our place, economically, as well as a fuzzy control for the photomechanical tracker, which allows to synchronize the apparent movement of the sun and have an optimal performance without using complex or expensive resources. This project is bio-inspired in the vegetable "Helianthus Annuus" that presents heliotropism to optimize the photosynthesis (also called sunflower, and in Mexico known also as "girasol", "jáquima", "maravilla", "tlapololote", "maíz de teja or acahual").

Alternative Energies, Intellygent System, Sun Tracker

Citación: LÓPEZ-XELO, Hilario, HERNÁNDEZ-MEDINA, José Juan y ROMANO-RODRÍGUEZ, Ma. Natividad. Diseño de un sistema fotomecánico inteligente con dos grados de libertad para la orientación de un panel fotovoltaico que optimice la producción de energía eléctrica. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-5: 27-32.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (hil_lx@hotmail.com)

Introducción

Las aplicaciones de las celdas FV (fotovoltaicas) son variadas desde usos domésticos, rurales, sistemas autónomos de bombeo de agua y de comunicaciones, sistemas de protección catódica, luces de indicación para tráfico aéreo y ferrocarriles, entre otras. Los paneles FV tienen un punto de operación en el cual producen la máxima potencia de salida. Sin embargo, este punto de operación es variante en función del tiempo y depende del grado de insolación y de la temperatura, de modo que se debe adoptar un sistema rastreador del Sol que optimice la producción de energía eléctrica.

Debido al movimiento aparente del sol, si la celda permaneciera estática no alcanzaría su punto óptimo, sino solamente una vez al día. La energía total producida en un día despejado puede optimizarse hasta en un 35% a 40% más para un colector móvil rastreador, que para un colector estático del mismo tipo. El objetivo es que el dispositivo rastreador garantice que siempre la fotocelda esté orientada hacia el sol de manera perpendicular incluso cuando se nubla. En este sentido, los sistemas de seguimiento solar permiten incrementar su rendimiento, la fiabilidad y permiten reducir costos. Además, al utilizar la energía solar reducirá la demanda de electricidad del sector convencional (Kumar et al, 2015).

Las celdas fotovoltaicas (FV) no aprovechan al máximo la energía solar incidente, de hecho, tienen una eficiencia relativamente baja. Los mejores paneles monocristalinos superan apenas el 20%, aunque el promedio es de 16%. Por su parte, los paneles amorfos apenas superan el 10%. Para los satélites y las naves espaciales se fabrican módulos de arseniuro de galio (GaAs) que alcanzan una eficiencia de 30%. La maximización de la potencia solar obtenida en un panel FV es de especial interés, en virtud de su baja eficiencia (Kharb et al, 2014)

Pero regresando al tema del seguidor solar, para orientar los paneles FV, hay dos propuestas: una de las alternativas es hacer un seguidor que se mueva según un calendario. Para ello, se deben conocer las coordenadas terrestres para saber hacia donde se va a ubicar dicho panel, así como el movimiento aparente con respecto al Sol, por cada fecha durante todo el año. Con esta información se puede orientar al panel FV durante todo el año.

La alternativa aquí propuesta es la de un sistema de energía solar de seguimiento solar de dos ejes utilizando la lógica difusa para controlar el proceso de manera inteligente. Uno de los ejes es necesario para seguir al sol en su recorrido diario aparente de oriente a poniente y el segundo eje para garantizar seguir siempre al sol de forma perpendicular de manera estacional. Por su parte, el programa sirve para controlar la parte mecánica. El hardware o parte mecánica, comprende las celdas solares, un microcontrolador, baterías de plomo-ácido, un motor paso a paso y el circuito de detección de luz (Huang et al, 2016), incluso en condiciones nubosas, lluviosas e imprevistas como un eclipse.

Mercado Objetivo del proyecto

Los sistemas seguidores son una opción viable, en virtud de las relativamente bajas eficiencias de estos sistemas de conversión de energía (Verma et al, 2016). Desde el punto de vista del impacto social, en México existen más de 190 000 poblados con menos de 5,000 habitantes, de las citadas poblaciones alrededor de 7% (13,330 localidades) no cuentan con energía eléctrica, lo que representa una población de más de 2,200,000 personas (INEGI, 2010).

Este sistema debe funcionar durante al menos 10 años, sin grandes gastos ni maniobras, pues sólo requerirá lubricación e inspecciones periódicas. Además, debe soportar la intemperie, sobre todo la lluvia y granizo, así como el viento y la temperatura en un rango de -15 °C a 50°C.

La lógica difusa

La lógica difusa es una teoría de conjuntos, en el que cada elemento tiene un número infinito de grados de pertenencia que oscilan entre cero y uno. En contraste, en los conjuntos tradicionales (también se llaman booleanos o duros) solo se tienen cero o uno (verdadero o falso) como grado de pertenencia. Por ejemplo, en términos de un conjunto duro, una persona, puede pertenecer al conjunto de los altos o de los medianos de estatura, pero de manera exclusiva: la persona es alta o es mediana y no hay más alternativas.

Pero, en los términos de los conjuntos difusos la misma persona puede pertenecer al conjunto de los altos en un 0.7, y a los medianos en 0.4, de una gama de valores entre 0 y 1 (Zadeh, 1965). Observe que la suma no es uno. Lofti Zadeh fue quien propuso esta metodología en 1965 (Huang et al, 2016).

Controlador inteligente por lógica difusa

La lógica difusa permitió diseñar los controladores inteligentes difusos o FLC, por sus siglas en inglés (*Fuzzy Logic Controllers*), capaces de tratar con situaciones ambiguas, complejas o difíciles de modelar matemáticamente. El FLC tiene como herramienta la lingüística más que en un modelo matemático (Aguirre et al, 2018). El diseño del controlador se basa en algunas reglas difusas. Dichas reglas son el compendio del conocimiento de un experto humano en el sistema que se desea controlar.

Dicho experto debe saber cómo se comporta el sistema, de acuerdo a las variables a controlar y cuál es la respuesta a las variaciones: de hecho el sistema depende totalmente de la experiencia del experto (Patel y Shewale, 2015). Este sistema es más exacto, ya que es más fácil y preciso de controlar el ángulo y se ajusta mejor por la características del control debido a las variaciones del ambiente externo (Huang et al, 2016) y la lógica difusa es una excelente opción de control para esta aplicación (Suganthi, 2015). Cada variable representa a un conjunto difuso. El criterio del experto se expresa en términos de dichas variables en reglas empíricas arbitrarias para describir un sistema. Dichas reglas determinan las interacciones entre las variables difusas y se plantean como un silogismo lógico de la forma **si... entonces...** Por ejemplo:

Si hace mucho calor **entonces** enciende a toda intensidad el clima artificial.

Si está muy oscuro **entonces** enciende todas las luces.

El FLC se compone de cuatro etapas: la fuzzificación, la base de reglas, el mecanismo de inferencia y la defuzzificación, mismas que a continuación se describen (Usta et al, 2011).

El valor de los conjuntos AM y PM se deben normalizar antes de ser tratados por el FLC y la salida debe ser convertida en un valor duro antes de ser usados por el control y por el motor respectivamente (El-Sayed y Leeb, 2015). Para normalizar se meten los valores en cinco funciones de pertenencia.

Etapa 1: La fuzzificación

La fuzzificación es el proceso que convierte los valores numéricos de entrada en términos de los grados de pertenencia de los miembros de los conjuntos difusos, a través de una función de pertenencia (Aguirre et al, 2018). Como ya se mencionó, dichos valores de pertenencia oscilan entre 0 y 1. Para determinar el rango de valores que pueden tomar las entradas, también llamado universo de discurso, para realizar una representación de estas señales *versus* el voltaje del panel FV para diferentes niveles de irradiación solar (Robles y Hómez, 2011)

Para construir el FLC, el primer paso es definir las funciones de pertenencia para las variables **iluminación en la mañana**, mismas que en este trabajo, se llama **AM** y la **iluminación en la tarde**, que lleva el nombre de **PM**. Los nombres de estas variables fueron elegidas de manera arbitraria y representan la cantidad de luz recibida en la mañana y en la tarde por el módulo FV.

A su vez, la variable AM (iluminación por la mañana), se dividió en los siguientes conjuntos difusos arbitrarios: muy_débil, débil, media, fuerte, muy_fuerte, como lo muestra el Gráfico 1. Un comentario aparte merece el hecho de que los nombres son breves y descriptivos, aunque no se ajustan a las reglas ortográficas.

Las mejores funciones para esta aplicación son las triangulares, le siguen las gaussianas y las de Cauchy, y al final las de tipo campana (Usta et al, 2011). Adicionalmente, las triangulares son las más sensibles, lo que aumenta la velocidad del tiempo de respuesta y reduce los errores. Adicionalmente, la forma de triángulo, es la más fácil de programar (Robles y Hómez, 2011).

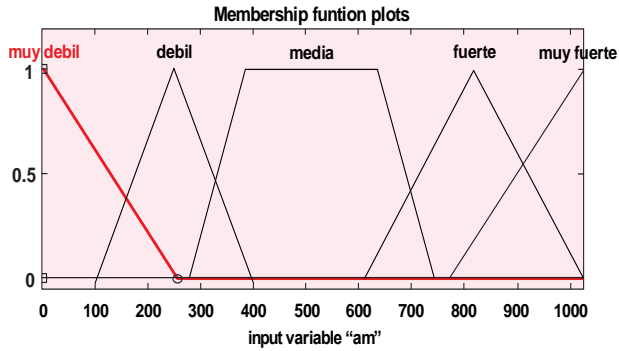


Gráfico 1 Variable de entrada iluminación por la mañana (AM)

Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte, la variable PM como se muestra en el grafico 2, se dividió en los siguientes conjuntos difusos arbitrarios: muy_débil, débil, media, fuerte, muy_fuerte, como lo muestra la siguiente figura.

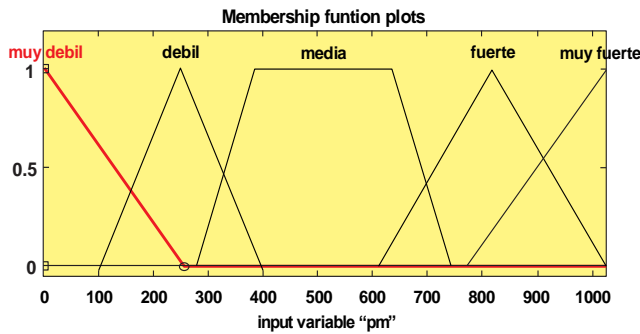


Gráfico 2 Variable de entrada iluminación por la tarde (PM)

Fuente: Elaboración Propia

Respecto a la variable de salida como se muestra en el grafico 3, tiene el nombre de **colocación**, precisamente representa el lugar en el que se va a colocar el panel FV y consta de cinco conjuntos difusos, que tienen los nombres de ext_oriente, oriente, medio, poniente, ext_poniente.

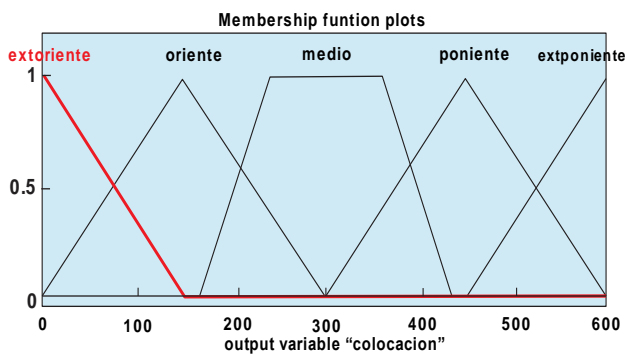


Gráfico 3 Variable de salida iluminación por la tarde (PM)

Fuente: Elaboración Propia

En este sentido, el motor de inferencia difusa proporciona los valores de entrada y define el uso de conjuntos difusos, y se cuantifican las funciones de pertenencia. Estas variables establecen la relación entre la luz recibida y el voltaje que detecta la fotocelda.

Etapa 2: La base de reglas difusas

El segundo paso del diseño del controlador difuso consiste en enumerar todas las reglas relevantes para el sistema. Estas reglas difusas establecen la relación de la corriente de salida de la célula solar con la iluminación del sol (Morales y Espinosa, 2018). Las reglas de control se evalúan mediante un mecanismo de inferencia y se representan como un conjunto de silogismos del tipo SI... ENTONCES... que se representan como una tabla de datos que incluyen la información relacionada al sistema (Robles y Hómez, 2011). Se tienen un total de 25 reglas, mismas que se pueden visualizar en la siguiente tabla.

El tablero de inferencia propuesto representa gráficamente la combinación deseada de entradas/salidas y el comportamiento del algoritmo de control para el sistema (Morales y Espinosa, 2018). El controlador difuso determina a partir de la tabla de reglas qué ajustes se debe hacer a fin de que el ciclo opere de manera adecuada (Abouobaida y Said, 2017).

AM PM	Muy débil	Débil	Media	Fuerte	Muy Fuerte
Muy débil	Medio	Oriente	Ext Oriente	Ext oriente	Ext oriente
Débil	Poniente	Medio	Oriente	Ext Oriente	Ext oriente
Media	Poniente	poniente	Medio	oriente	oriente
Fuerte	Ext poniente	Ext poniente	poniente	medio	oriente
Muy Fuerte	Ext poniente	Ext poniente	Ext poniente	poniente	medio

Tabla 1 Las reglas de inferencia del seguidor solar

Fuente: Elaboración Propia

Por ejemplo, si se toma la primera columna, el conjunto de reglas derivadas de la tabla se plantea tomando primero el valor de **AM**, con la conjunción **y** el valor del conjunto o variable **PM**, con el consecuente obtenido leyendo la intersección entre ambas. A continuación se presentan en forma de silogismo, las dos primeras reglas de la primera columna: Si la iluminación en **am** es muy **débil** y la iluminación **pm** es **muy débil**, entonces la **posición** debe ser **medio**.

Si la iluminación en **am** es muy **débil** y la iluminación pm es **débil**, entonces la **posición** debe ser hacia el **poniente**.

Etapa 3: La inferencia difusa

El tercer paso del diseño del controlador difuso es decidir qué tipo de mecanismo o motor de inferencia difusa se debe utilizar como se muestra en el grafico 4. El mecanismo de inferencia verifica la toma de decisiones al interpretar y aplicar el conocimiento experto empírico. Para este sistema, se considera una relación máximo - mínimo como el método de inferencia difusa. La salida del conjunto difuso se toma como la intersección y el conjunto difuso final será la unión de los conjuntos difusos y así poder determinar su valor de salida para lograr la orientación de los paneles FV.

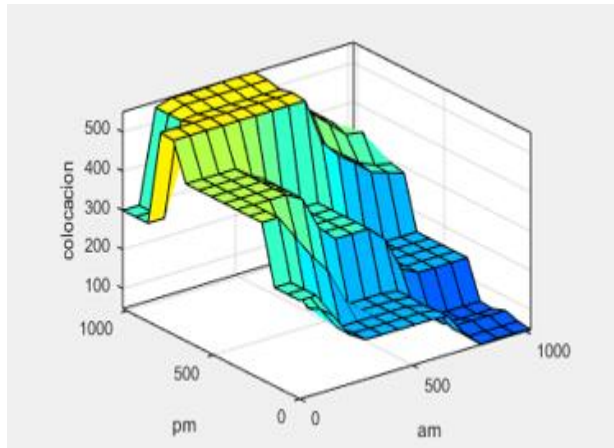


Gráfico 4 Área de control de sistema de interrelación de variables: entrada, AM y PM y variable de salida, COLOCACIÓN

Fuente: *Elaboración Propia*

Cada regla se evalúa en forma secuencial, de izquierda a derecha; pero todas ellas son tratadas como si fueran evaluadas simultáneamente. Durante la evaluación de reglas tienen lugar dos operaciones lógicas **and** y **or**. La operación difusa **and** se usa para conectar los antecedentes dentro de una misma regla. El operador difuso **and** corresponde a la operación difusa MIN, que sirve para sacar el valor mínimo y la operación difusa **or** que corresponde a MAX, operador que saca el valor máximo. El tratamiento de las reglas sucesivas se realiza mediante la operación difusa **or**. A este procedimiento difuso, AND - OR se le llama razonamiento de tipo Mamdani.

Etapa 4: La defuzzificación

La parte de interfaz de defuzzificación permite que las decisiones del mecanismo de inferencia se concreten en términos de salidas duras (0 ó 1) que definitivamente representen una acción para el sistema. Se puede afirmar que la operación inversa a la fuzzificación es la defuzzificación. De hecho existen diferentes métodos para realizar esta operación (Patel y Shewale, 2015):

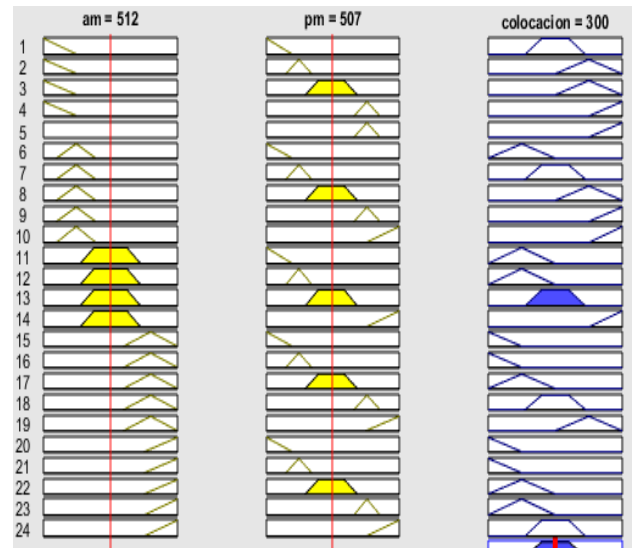


Gráfico 5 Interacción entre conjuntos de entrada, y salida Fuente: *Elaboración Propia*

Análisis de resultados

Se usa un motor paso a paso para hacer girar el panel solar en la dirección del sol. La posición del sol se monitorea por parte del programa difuso con dos elementos de entrada (AM y PM) y un conjunto de salida llamado **posición** (que se traduce en el movimiento del motor paso a paso). El voltaje de cada sensor se convierte a formato digital usando un convertidor analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés, *analog digital conversor*) y se pasan al FLC para alinear el panel en la dirección del sol.

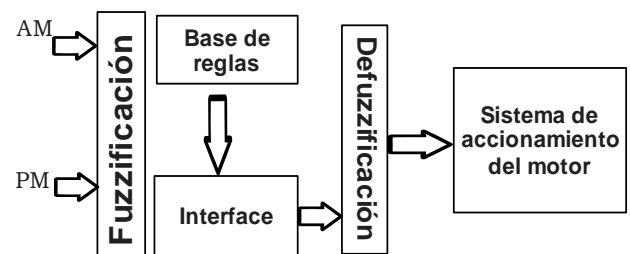


Figura 1 Cuatro fases de control difuso en el sistema.

Fuente: *Elaboración Propia*

El control de lógica difusa utiliza la corriente producida en los paneles solares por la luz del sol para determinar el tiempo para activar el motor paso a paso para conducir los paneles solares a la posición correcta. Al usar el control de lógica difusa para detectar la luz del sol y la del panel solar cada cinco minutos durante doce horas, el motor de pasos opera 144 veces en un día. El software inteligente le permite al sistema tomar mejores decisiones para posicionarse incluso si el día está nublado, lluvioso, o si ocurriera un evento como un eclipse.

Por otra parte, cuenta con una rutina para aumentar el tiempo al doble cuando la luminosidad del sol es baja, lo que nos permitiría reducir el número de veces que el motor arranca y así abatir el dispendio de energía. Otra parte importante es que llegando la noche, el sistema tiene una rutina programada que le permite posicionarse para esperar la salida del sol con un solo arranque del motor. Aunque el microcontrolador tiene algunas ventajas como su bajo precio y su facilidad para programarse, puede presentar algunos problemas al tratar con sistemas de control complejos. Un trabajo a futuro es tratar este problema con algún recurso de cómputo paralelo como FPGA o una tarjeta NVIDIA (Patel y Shewale, 2015).

Conclusiones

A nivel mundial se visualizan aportaciones importantes en el uso y desarrollo de energías alternativas, de manera que el aporte al cuidado del ambiente sea efectivo pero también se tenga un impacto significativo en la producción de energía y en la optimización de la producción de la misma. En México, la sinergia entre las instituciones que administran, investigan y trabajan con energías alternativas, es parte fundamental del desarrollo de tecnologías propias que fomenten y fortalezcan su implementación en el país.

Las fotoceldas son dispositivos que permiten obtener energía eléctrica con el criterio de optimización de costos *versus* energía. Se usa control difuso para aplicaciones en las que los datos de entrada son fragmentarios y ambiguos y tiene que funcionar en tiempo real. Por otra parte, también se trata de diseñar este sistema con los medios fácilmente disponibles para su fabricación y mantenimiento y adaptándolo al entorno del Centro de México.

El sistema tendrá dos grados de libertad a fin de lograr adaptarse a las estaciones del año y al recorrido aparente diario del Sol por el horizonte. Se pretende tener una fuente de energía confiable, de mejor calidad, lograr un uso óptimo, mejor conservación y desempeño de los dispositivos que se pudiesen conectar a este sistema.

Referencias

Abouobaida, H., & Said, E. B. (2017). *Practical Performance Evaluation of Maximum Power Point Tracking Algorithms in a Photovoltaic System. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 8(4), 1744-1755.

Aguirre, J. C. P., Agundis, A. R., Segura, E. J. R., & Nolasco, J. J. M. (2018). *CONTROL DIFUSO PARA UN CONVERTIDOR CD-CD APLICADO A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN LOS MODOS MPPT Y CV. Pistas Educativas*, 39(128).

El-Sayed, M. A., & Leeb, S. (2015, April). *Fuzzy logic based maximum power point tracking using boost converter for solar photovoltaic system in Kuwait. In International conference on renewable energies and power quality, Spain (Vol. 14, No. 13, pp. 433-443)*.

Huang, C. H., Pan, H. Y., & Lin, K. C. (2016). *Development of intelligent fuzzy controller for a two-axis solar tracking system. Applied Sciences*, 6(5), 130.

Kharb, R. K., Shimi, S. L., Chatterji, S., & Ansari, M. F. (2014). *Modeling of solar PV module and maximum power point*

Kumar, A. P., Parimi, A. M., & Rao, K. U. (2015, February). *Implementation of MPPT control using fuzzy logic in solar-wind hybrid power system. In Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), 2015 IEEE International Conference on (pp. 1-5). IEEE*.

Lee, C. Y., Chou, P. C., Chiang, C. M., & Lin, C. F. (2009). *Sun tracking systems: a review. Sensors*, 9(5), 3875-3890.

Morales Ospina, D. A., & Espinosa Romero, F. A. (2018). *Lámpara Led Inteligente Alimentada Por Paneles Solares*.

Patel, R. R., & Shewale, M. A. N. (2015). *Intelligent Sun Tracking System Using FLC Implemented On FPGA*. *Int. J. Adv. Found. Res. Comput*, 2(10), 260-263.

Robles, C., & Hómez, G. A. V. (2011). *Control del punto de máxima potencia de un panel solar fotovoltaico, utilizando lógica difusa*. *Télématique: Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, 10(2), 54-72.

Sánchez Chávez, S., & Mosquera Jiménez, J. T. (2017). *Suministro de energía basada en celdas solares a una red de sensores inalámbrica orientada al internet de las cosas por medio de un control de lógica difusa*.

Suganthi, L., Iniyar, S., & Samuel, A. A. (2015). *Applications of fuzzy logic in renewable energy systems—a review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 585-607.

Usta, M. A., Akyazi, Ö., & Altaş, İ. H. (2011, December). *Design and performance of solar tracking system with fuzzy logic controller used different membership functions*. In *Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2011 7th International Conference on* (pp. II-381). IEEE.

Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M., & Dash, S. K. (2016). *Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1018-1034.

Zadeh, L.A. *Fuzzy sets*. *Inf. Control* 1965, 8, 338–353. [CrossRef]