

Técnicas de predicción Inteligente para el control del MPPT en un sistema fotovoltaico.

Jhon Lizarazo
Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA.

Resumen: En el trabajo se realiza la identificación de técnicas de predicción utilizadas en el control del MPPT para sistemas fotovoltaicos.

Palabras claves: Sistema fotovoltaico, control del MPPT, Predicción Inteligente

DESARROLLO

La generación de energía eléctrica se realiza por medio de la combustión controlada de un combustible fósil, el más utilizado en Norte de Santander principalmente por termotasajero es el carbón el cual tiene un impacto en la emisión de contaminantes atmosféricos GEI como material particulado (PM_{10}), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de Carbono (CO). En la termoeléctrica termotasajero para el enfriamiento del vapor que sale de las turbinas se utilizan grandes volúmenes de agua del río Zulia, la misma debe ser retornada al río y vuelve a una temperatura más elevada causando un impacto ambiental en las especies circundantes. Para controlar las emisiones contaminantes las empresas hidroeléctricas utilizan filtros para vigilar las micropartículas emitidas al espacio entre los cuales están los filtros de mangas, y precipitado electrostático, para el caso del NO_2 se disponen de tratamientos durante la combustión o poscombustión: quemadores de bajo NO_2 y combustión escalonada, y poscombustión reducción catalítica selectiva. La mejor forma de controlar el impacto ambiental y cambio climático es con un uso racional y eficiente de la energía eléctrica en la industria, en los hogares y en las ciudades, aplicando monitoreo de

eficiencia energética para mediciones de luminotecnica, radiación solar, potencia eléctrica en energía convencional y energías alternativas, puestas a tierra y mediciones de calidad de la energía generando nuevos conceptos como son Smart City, Smart Home, Smart Building con el objeto de aplicar normatividad vigente dentro de la ISO/IEC NTC 50001 para la elaboración por parte de las industrias de sistemas de gestión eficiente de energía.

Los dispositivos implementados en los sistemas fotovoltaicos tienen tres etapas que son la generación con celda fotovoltaica, inversor y controlador de carga de baterías para el almacenamiento de energía, dicho sistema debe contener un sistema de seguimiento de máximo punto de potencia que son los encargados de ajustar la generación con respecto a la carga para optimizar el proceso en el convertidor de energía.

La política nacional de ciencia tecnología e innovación para el desarrollo sostenible establece objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que vinculan sectores relacionados estrechamente con la eficiencia energética en particular la aplicación de energías no convencionales como lo son, fotovoltaica, eólica y solar por mencionar algunos de ellos (COLCIENCIAS - Gobierno de Colombia, 2018). En el marco del ODS 7 llamado energía asequible y no contaminante, se plantea por parte de la UPME Unidad de planeación minero energética un plan de acuerdo al mapa energético de Colombia donde se deben cumplir los compromisos adquiridos en París en la Convención Marco sobre el cambio climático CP21 a CP24. (ONU, 2019).

El cumplimiento del mismo propone caracterizar los potenciales de recursos renovables que se pueden aprovechar en la región norte de Santander sin importar los cambios repentinos en la irradiancia por causas atmosféricas como por ejemplo el paso de una nube. La Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono con mandato de la Comisión Intersectorial de Cambio Climático, creada por el decreto 298 de 2016 del SISCLIMA, ha liderado un proceso de distribución sectorial de las obligaciones de reducción de emisiones para cumplir con la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC por sus siglas en inglés). Algunos países pioneros en esta implementación como Alemania, Francia, Republica de Singapur, etc.

Adoptaron medidas estimulando su implementación para vender este tipo de energía si se produce un alto nivel de las mismas, fomentando el desarrollo auto sostenible de sistemas renovables.

JUSTIFICACIÓN:

La ley 1715 de 2014 busca fomentar y promover el uso de energía renovable en el país, por lo que ha reglamentado una serie de incentivos tributarios aprobados y otorgados por la ley 028 de la UPME a los cuales se puede acceder si invierte en un sistema de energía solar fotovoltaico. Deducción de impuesto de renta: plazo de 5 años para utilizar el beneficio, se puede descontar el 50% de la inversión de la base gravable del impuesto. La deducción no puede ser mayor al 50% de la renta líquida del periodo.

Depreciación acelerada: Se puede depreciar el otro 50% del activo de manera acelerada a un 20% anual durante 5 años. La depreciación se puede incluir como un gasto en el estado de resultados y reduce el impuesto de renta.

Exención de IVA y aranceles: El propietario no paga IVA sobre el proyecto ni el contratista lo cobra. La exención de aranceles para el material y equipos importados para el proyecto.

Con la ley 1715 de 2014, el estado colombiano promueve el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente renovables, en el sistema energético nacional (Ley N° 1715, 2014). En este contexto, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) estableció la regulación de las actividades de autogeneración a pequeña escala (AGPE) y de generación distribuida (GD) en el Sistema Interconectado a través de la resolución 030 del año 2018. El artículo 5 de este documento establece los estándares técnicos de disponibilidad del sistema en el nivel de tensión 1, los cuales limitan a que la suma de la potencia instalada de GD o de las AGPE que entregan energía a la red debe ser igual o menor al 15% de la capacidad nominal del circuito, transformador o subestación, y la cantidad de energía en una hora que pueden entregar la GD o las AGPE basados en energía solar sin almacenamiento, no debe

superar el 50% del promedio horario anual de mínima demanda diaria para el año anterior, entre las 6 am y 6 pm (CREG No. 030, 2018) y (Gómez Ramírez, Murcia Murcia, & Cabeza Rojas, 2017). Esto no interviene en sistemas con almacenamiento de energía en baterías debido a la gestión inteligente de Energía permite la conmutación a tres tipos de carga que son utilidad o red, generación fotovoltaica y baterías.

a) MARCO CONCEPTUAL:

Los recursos energéticos usados para generar electricidad se dividen en combustibles fósiles (Petróleo, Carbón, Gas natural), combustibles nucleares, y recursos renovables (hidroeléctrica, eólica, solar, hidrógeno, biomasa, marea oceánica y geotérmica) (Capareda & Capareda, 2019). La UPME (Unidad de Planeación minero energética) en su último mapa energético de Colombia establece que el consumo final de energía se subdivide en los sectores transporte, industrial, residencial, comercial y otros como se muestra en la figura 1 (Gómez Ramírez et al., 2017).

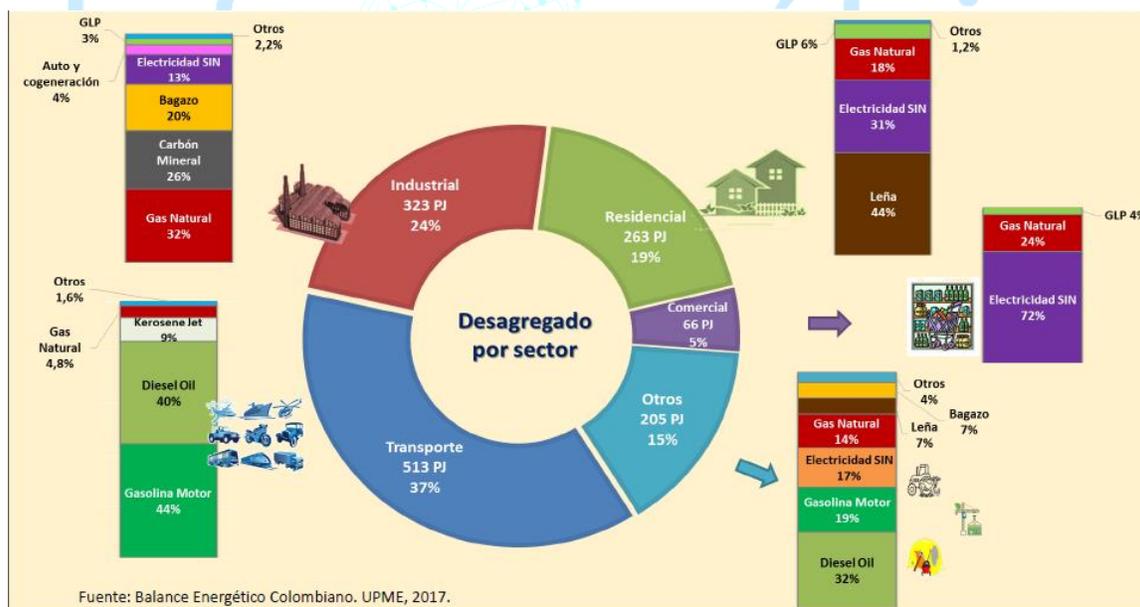


Fig 1. Balance energético colombiano 2017. UPME.

La demanda mundial de energía está cubierta hoy principalmente por los combustibles fósiles: petróleo, gas natural y carbón. Más del 80%, mientras que la biomasa, la energía hidroeléctrica y las energías renovables (eólica, fotovoltaica, calor solar, etc.) hasta ahora solo ha alcanzado el

10%. Mientras tanto, el fuerte uso de fuentes fósiles ha llevado a la escasez de los mismos. Actualmente se encontraron más reservas de petróleo, pero el consumo anual ha aumentado sustancialmente. Luego, las reservas se reducirán drásticamente, causando la escasez de combustibles, lo que provocará un fuerte aumento de los precios y guerras de distribución (Harrag & Messalti, 2019).

Las ZNI son un nicho de oportunidad directo para el despliegue de las tecnologías de FNCER (Fuentes no convencionales de energía renovable), y representan una prioridad del Gobierno Nacional para su implementación, teniendo en cuenta ante todo la disponibilidad de recursos como el solar, el hídrico, biomasa o el eólico dependiendo de la zona específica a ser atendida (Unidad de Planeación Minero Energética. Ministerio de Minas y Energía. Colombia., 2012).

Durante los últimos años se ha establecido metas a cumplir por parte de los países de la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) dentro de los cuales se encuentra Colombia, Norte de Santander representa un promedio de 4,5 KW/m²/día según (Ideam, 2005), ello sustenta el contenido de la presente propuesta iniciando con el estudio de las técnicas inteligentes aplicadas actualmente para el seguimiento del máximo punto de potencia MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) en los sistemas fotovoltaicos con el objetivo de aumentar la eficiencia energética de forma automática en las arquitecturas tradicionales de este tipo de energía. La eficiencia energética de una planta fotovoltaica es afectada por la eficiencia del panel solar, el convertidor o inversor y la eficiencia del algoritmo MPPT. El seguimiento del inversor y del panel no es determinada fácilmente debido al hardware disponible para la implementación, pero el aplicar técnicas inteligentes en sus algoritmos facilita significativamente esta tarea. (Karami, Moubayedb, & Outbibc, 2017).

Hasta ahora existen muchos algoritmos publicados que se pueden clasificar según la eficiencia, velocidad de convergencia, complejidad, sensores requeridos, costo, hardware de implementación. Cabe resaltar que no había un estándar hasta el standard Europeo EN 50530 de 2010 el cual contiene un procedimiento para la medición del MPPT en inversores para

sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, donde se consideran parámetros de eficiencia estática y dinámica de los MPPT.

La irradiancia y la temperatura afecta la salida de potencia fotovoltaica. Estas condiciones atmosféricas no son constantes durante el día, esto causa que el MPP se mueva dependiendo de estas condiciones ocurriendo grandes pérdidas de potencia en el MPP, sin embargo, es esencial el seguimiento al MPP ya que en unas condiciones conviene para obtener la máxima potencia disponible del panel solar.

El MPPT consiste en ajustar el voltaje de salida del sistema fotovoltaico para extraer la máxima potencia disponible ante un cambio de temperatura e irradiancia. Las técnicas para realizar esta tarea se clasifican en 5 grupos, técnicas de seguimiento con parámetros constantes, técnicas con medición y comparación, técnicas de seguimiento con prueba y error, técnicas de seguimiento con cálculos matemáticos y técnicas con predicción Inteligente, en este trabajo se abordará las técnicas inteligentes que son aplicaciones de lógica difusa, redes neuronales y algoritmos biológicos con topologías de enjambre (Karami et al., 2017). También se debe tener en cuenta que existen técnicas de corrimiento o sliding con naturaleza no lineal para el desempeño de controladores de MPPT con leyes de control cambiantes y discontinuas (Lachtar & Bouraiou, 2019).

Existen muchos modelos de un sistema solar fotovoltaico que permiten predecir el comportamiento en estado estable pero por la naturaleza variable de las condiciones de operación se aborda los controladores con la curva característica de corriente vs voltaje para estimar parámetros con métodos analíticos y heurísticos como lo plantea (Khursheed, Faisal, Khan, Ali, & Khan, 2019). El método Fuzzy presenta una solución práctica por su facilidad de implementación, rapidez y robustez sin un conocimiento profundo del modelo del sistema pero requiere un conocimiento profundo de la operación del sistema, de la misma forma que los métodos híbridos tienen que ver son los algoritmos P&O donde se vincula un desacople de los

dos algoritmos MPPT (Hala & El, 2019), estos casos particulares poseen conocimientos en caso de estudio para realizar la replica de las referencias citadas sin dejar atrás las técnicas P&O como técnicas tradicionales que funcionan bajo ciertas condiciones de operación presentando simplicidad en el algoritmo implementado (Qazi, 2019) y (Hussain, leee, Sher, & leee, 2019). A partir del control inteligente nacen las aplicaciones para el dispositivo en un sistema de gestión eficiente de energía tal como lo menciona (Yousefi, Kianpoor, Hajizadeh, & Soltani, 2019).

Algunos autores proponen una arquitectura con un controlador PI después del sistema de seguimiento MPPT para establecer una convergencia de la respuesta dinámica en estado estable como lo menciona (Triki, Bechouche, Seddiki, Abdeslam, & Member, 2019). Estos métodos son una estrategia para reducir el tiempo de cálculo del algoritmo en diferentes etapas inclusive calculando la inductancia en línea como lo propone (Inverters & Hammoud, 2019). Una de las técnicas mas abordadas son los controladores Fuzzy los cuales tienen buen tiempo de respuesta en (Luta & Raji, 2019) se concluye que el controlador tipo Sugeno es más rápido que el Mamdani. En (Rekik, 2019) se observa una implementación de un control inteligente tipo Fuzzy Mamdani donde información al respecto de la complejidad del algoritmo asegurando que la convergencia depende directamente de la tabla de inferencia, los resultados de las simulaciones del trabajo muestran un comportamiento rápido, sin sobreimpulsos y menos fluctuaciones en los cambios rápidos en la irradiancia . donde En (Malik, 2019) se observa un caso particular de un convertidor al cual se implementó una red neuronal artificial ANN como técnica de MPPT demostrando la mejora de eficiencia y rapidez del sistema.

Otro aspecto importante dentro del marco referencial es el hardware que presente las mejores características para la aplicación embebida sea un microcontrolador, microprocesador o un dispositivo FPGA que presente el mejor rendimiento del algoritmo debido a los factores críticos, en (Necaibia, Samira, Labar, Necaibia, & Castronuovo, 2019) se observa un controlador de bajo costo que implementa un dispositivo microcontrolador PIC16F877A el cual es necesario validar dentro de la presente investigación por su limitada memoria y velocidad de operación en comparación con otros dispositivos disponibles en el mercado con un convertidor SEPIC.

En (Negi, Maity, Patra, & Sharad, 2019) se implementa un circuito con el método de voltaje fraccional adaptativo circuito abierto (AFOCV) fue diseñado con un proceso de 180nm con una máquina de estados tipo contador ascendente descendente. Expone los bloques funcionales del dispositivo para una validación en el presente proyecto. En (Bagci, Liu, & Kim, 2019) se tiene una implementación con un microcontrolador MSP430 de texasinstruments que tiene algunas prestaciones comparables con el microcontrolador mostrado en (Necaibia, Samira, Labar, Necaibia, & Castronuovo, 2019) pero no deja de ser un dispositivo para un proyecto de menor tamaño en el laboratorio. En (Bahri et al., 2019) se muestra un observador no lineal para una carga trifásica conectada a una red de sistema fotovoltaica lo cual permite reducir el numero de sensores usados en la aplicación reduciendo el costo de la misma, también aplica un método de respaldo basado en criterio de estabilidad de Lyapunov empleado en el diseño del controlador, el enfoque de esta aplicación es lograr el máximo punto de potencia bajo diferentes condiciones controlando la conmutación de potencia del inversor DC/AC. En (Gonzalez, 2019) se presenta el diseño e implementación de un sistema de gestión de energía para el hogar (HEMS) con un sistema IoT y un Machine Learning que permite predecir la irradiancia basado en mediciones de un SoC (System on Chip) y una Raspberry, cabe resaltar que en las recomendaciones del paper menciona que se necesita aumentar la confiabilidad del dispositivo. En (Kumar & Panda, 2018) se muestra un desarrollo con un dispositivo FPGA para un sistema eólico que resalta la verificación en tiempo real del algoritmo de control de gestión de potencia en el convertidor aprovechando las características de la tarjeta Virtex-7 FPGA y ZYNQ ZC702 optimizando los tiempos de respuesta para el observador. (Aguilar, Espinoza-Trejo, Saavedra, De Angelo, & Taheri, 2019) plantea un controlador no lineal para la generación del ciclo útil, se estudia un controlador de bajo costo orientado al voltaje utilizando un microcontrolador TMS320F28379D.

CONCLUSIONES_

Se presentan las diferentes técnicas utilizadas para la implementación de controladores con MPPT, centrándonos FPGA y algoritmo convencional P&O muestran buenos resultados en tiempo y variación de irradiancia.

Las herramientas de inteligencia artificial pueden ser aplicadas en el análisis energético de los sistemas fotovoltaicos en condiciones de campo obteniendo excelentes resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, P. V., Espinoza-Trejo, D. R., Saavedra, J. L., De Angelo, C. H., & Taheri, S. (2019). Nonlinear Control of a Boost DC/DC Converter for Photovoltaic MPPT Systems Using a TMS320F28379D Microcontroller. *Proceedings of 2019 the 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering, SEGE 2019*, 156–161. <https://doi.org/10.1109/SEGE.2019.8859951>
- Bagci, F. S., Liu, Y. C., & Kim, K. A. (2019). Low-power photovoltaic energy harvesting with parallel differential power processing using a SEPIC. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2019-March, 2008–2014*. <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8722071>
- Bahri, H., Oualifi, K., Aboufatah, M., Guisser, M., Adekanle, O. S., & El Malah, M. (2019). Nonlinear observer-based control for three phase grid connected photovoltaic system. *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems, WITS 2019*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723685>
- Bouselham, L., Hajji, M., Hajji, B., Mehdi, A. El, & Hajji, H. (2016). Hardware implementation of fuzzy logic MPPT controller on a FPGA platform. *Proceedings of 2015 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2015*, (1). <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455090>
- Capareda, S. C., & Capareda, S. C. (2019). Introduction to Renewable Energy. *Introduction to Renewable Energy Conversions*, 1–28. <https://doi.org/10.1201/9780429199103-1>
- Castro, A. O. (2014). Modelado y simulación de un panel fotovoltaico empleando técnicas de inteligencia artificial. *Ingeniería Energética, XXXV(3)*, 225–233.

- COLCIENCIAS - Gobierno de Colombia. (2018). *Libro verde 2030 – Colciencias*. Retrieved from <http://libroverde2030.com/#.WyA1IJOBcRM.whatsapp>
- Gómez Ramírez, J., Murcia Murcia, J. D., & Cabeza Rojas, I. (2017). La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas. *Universidad Santo Tomás*, 19. Retrieved from <http://repository.usta.edu.co/handle/11634/10312>
- Gonzalez, W. B. (2019). Battery Monitoring and Energy Forecasting for an Off-Grid Solar Photovoltaic Installation. *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, 697–702. <https://doi.org/10.1109/RoboMech.2019.8704728>
- Hala, P., & El, J. (2019). Recapitulation and comparative study for Photovoltaic Maximum Power Point Tracking techniques in particular sensor quality. *2019 IEEE 7th Palestinian International Conference on Electrical and Computer Engineering (PICECE)*, (2), 1–6.
- Harrag, A., & Messalti, S. (2019). IC-based variable step size neuro-fuzzy MPPT Improving PV system performances. *Energy Procedia*, 157, 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.201>
- Hussain, A., Ieee, S., Sher, H. A., & Ieee, M. (2019). Revised Perturb and Observe Approach For Maximum Power Point Tracking Of Photovoltaic Module Using Finite Control Set Model Predictive Control. *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 962–967.
- Ideam. (2005). Atlas Radiación Solar. *Atlas de Radiación Solar de Colombia, Primera*, 133.
- Inverters, G. P., & Hammoud, I. (2019). Computationally Efficient Model Predictive Direct Power Control with Online Finite Set Model Inductance Estimation Technique for. *2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE)*, 1–6.
- Ferrin, C. & Magdalena, X. (2013). Sistema de extracción automática de parámetros morfológicos de la huella plantar mediante técnicas de visión por computador en un sistema embebido. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, ISSN: 1692-7257, 1(23), pp 80-86.
- J Guzmán-Luna, ID Torres., (2017), Propuesta de un generador de aplicaciones educativas

- basadas en televisión digital usando arquitectura de cómputo en la nube. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257.
- Karami, N., Moubayedb, N., & Outbibc, R. (2017). General review and classification of different MPPT Techniques, *68*(September 2016), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.132>
- Khursheed, M., Faisal, M., Khan, N., Ali, G., & Khan, A. K. (2019). A Review of Estimating Solar Photovoltaic Cell Parameters. *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (ICoMET)*, 1–6.
- Kumar, V. N., & Panda, G. (2018). FPGA Implementation of Power Management Algorithm for Wind Energy Storage System with Kalman Filter MPPT Technique. *Proceedings of the IEEE International Conference on VLSI Design, 2018-Janua*, 449–450. <https://doi.org/10.1109/VLSID.2018.107>
- Lachtar, S., & Bouraiou, A. (2019). Smooth Sliding Mode-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Applications, 253–258.
- Luta, D. N., & Raji, A. K. (2019). Comparing fuzzy rule-based MPPT techniques for fuel cell stack applications. *Energy Procedia*, *156*(September 2018), 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.124>
- Malik, M. (2019). Designing a Novel ANN Optimized Converter for Photovoltaic Solar System. *2019 International Conference on Automation, Computational and Technology Management (ICACTM)*, 52–57.
- Márquez, L. E., Abdo, Y. N., & Ángulo, F. J. (2015). Prototipo de control de acceso a aulas y registro automático de asistencia. *Revista colombiana de Tecnologías Avanzadas*, Vol 2, No. 26, 41-47.
- Necaibia, S., Samira, M., Labar, H., Necaibia, A., & Castronuovo, E. D. (2019). Enhanced auto-scaling incremental conductance MPPT method , implemented on low-cost microcontroller and SEPIC converter. *Solar Energy*, *180*(January), 152–168. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.028>
- Negi, S., Maity, A., Patra, A., & Sharad, M. (2019). Adaptive Fractional Open Circuit Voltage Method for Maximum Power Point Tracking in a Photovoltaic Panel. *2019 32nd*

- International Conference on VLSI Design and 2019 18th International Conference on Embedded Systems (VLSID)*, 482–487. <https://doi.org/10.1109/VLSID.2019.00101>
- ONU. (2019). Convención Marco sobre el Cambio Climático 2009, 60566, 1–48.
- Qazi, R. A. (2019). Implementation of an Efficient MPPT Algorithm for Photovoltaic System. *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (ICOMET)*, 1–7.
- Rekik, H. K. (2019). Grid-connected photovoltaic panel via an inverter. *2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 423–428.
- T Velásquez, E Espinel, G Guerrero (2016). Estrategias pedagógicas en el aula de clase. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257.
- Triki, Y., Bechouche, A., Seddiki, H., Abdeslam, D. O., & Member, S. (2019). ADALINE Based MPPT With Indirect Control Mode for Photovoltaic Systems. *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2183–2188.
- Unidad de Planeación Minero Energética. Ministerio de Minas y Energía. Colombia. (2012). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia Integración de las energías en Colombia*.
- Yousefi, M., Kianpoor, N., Hajizadeh, A., & Soltani, M. (2019). Smart Energy Management System for Residential Homes Regarding Uncertainties of Photovoltaic Array and Plug-in Electric Vehicle. *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2201–2206.