

## Mejoras en un sistema fotovoltaico utilizando técnicas inteligentes que alimenta un inversor de frecuencia en bombas electrosumergibles.

Luis E Neira Ropero  
Universidad de Pamplona

### Resumen:

En el trabajo se tiene en cuenta la distribución espacial y temporal del potencial energético solar, se identifica las zonas estratégicas adecuada para la utilización de la energía solar, se presentan diferentes técnicas inteligentes para optimizar el sistema fotovoltaico.

**Palabras claves:** Sistema fotovoltaico, energía solar, bombas electrosumergibles.

### Desarrollo.

La posición geográfica con que cuenta los departamentos como Casanare, Arauca, Meta, Vichada entre otros pocos, hace que se tenga una intensidad en radiación solar superior a los  $4,5 \text{ Kh/m}^2$  por día<sup>1</sup>. Al mismo tiempo, por el congreso de la republica de nuestro país, en el año 2014, fue aprobada la ley 1715 de este mismo año “por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”, adicionalmente tenemos el decreto 2134 del 2015 “por el cual se adiciona un Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de incentivos establecidos en el capítulo III de la ley 1715 de 2014”, la Resolución CREG 201 DE 2017 “Por la cual se modifica la resolución CREG 243 de 2016, que define la metodología para determinar la energía firme para el cargo de confiabilidad, ENFICC, de plantas solares fotovoltaicas” y la Resolución CREG 030 de 2018 “por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el sistema interconectado nacional”.

---

<sup>1</sup> <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/1.Distribucion-espacial-y-temporal-de-la-Irradiacion-Global-Horizontal-en-Colombia.pdf>

Y teniendo en cuenta que el Departamento de Casanare cuenta con insumos como el Plan de Desarrollo Departamental 2016-2019 “Con Paso Firme”, el Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación (PEDCTI) y el Plan Regional de Competitividad de Casanare 2012. Tienen como enfoque entre sus líneas programáticas impulsar la investigación para el desarrollo sostenible del territorio en los focos priorizados en el CTel e implementar procesos de innovación en los focos priorizados en CTel del departamento, orientados hacia una producción más limpia.

Es por esto, que esta propuesta está enfocada a ayudar a dar soluciones a estas necesidades que son de carácter urgente y priman en el departamento, como lo son el mayor aprovechamiento de la radiación solar y aumentar la eficiencia de los sistemas de bombeo fotovoltaico, además contribuye a llevar a cabo diferentes logros propuestos de él plan de gobierno 2020-2023 “Es el tiempo de Casanare”, incluyendo que cubre varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en los cuales se busca poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para 2030.

### **JUSTIFICACIÓN.**

El fenómeno de El Niño ha desencadenado en los últimos años una serie de afectaciones a lo largo y ancho de nuestro país, pero Casanare ha sido uno de los departamentos más afectados por dicho fenómeno (e.g.1991-1992, 1997-1998 y 2015-2016), de ahí que el gobierno nacional en su momento, se vio obligado a crear estrategias para prevenir y mitigar los efectos y consecuencias que conllevaban estos cambios climáticos bruscos; estrategias como las de CONPES 2948 aprobada en 1997, CONPES 2985 aprobado en 1998 y los Planes Nacionales de Contingencia para el fenómeno El Niño de 1997-1998 y 2015-2016. (Palacios, Kimberly Geraldine; Sánchez, Yermey; Rodríguez, Rolando, 2018).

<sup>2</sup> <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/2985.pdf>

De ahí el gobierno nacional realizó un trabajo que cuantifica el impacto de las próximas sequías en el país, tanto en costos económicos como los efectos de disminución de recursos hídricos, la pérdida de ecosistemas como sabanas y bosques, las cuales se generan por incendios forestales; y como resultado se obtuvo un 20% en reducción de cantidades de agua y un incremento en los costos del precio de la energía eléctrica en un 4.5% (Melo, Sioux Fanny; Riveros, Leidy Cáterin; Otálora, German; Alvares, Andrés Camilo; Díaz, Carolina; Calderón, Silvia Liliana, 2017)<sup>3</sup>

De ahí, es muy común escuchar en el departamento de Casanare y más en épocas de verano, que las tierras están improductivas por causa de las sequías y/o que los animales de diferentes especies mueren por falta de agua<sup>4</sup>; por ello la preocupación por este tema, ya que conlleva repercusiones ambientales y socioeconómicas abrumadoras.



Figura 1. Sequía en Casanare. Imagen de Revista SEMANA. Marzo, 2014.

En sectores como la agroindustria y en sitios aislados o desconectados de la red eléctrica, la energía y el agua siguen siendo necesidades que presentan una prioridad altísima, en donde el agua es suministrada desde alguna fuente superficial o subterránea, donde normalmente son usadas bombas a combustión, las cuales contaminan el medio ambiente.

<sup>3</sup> <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Economicos/466.pdf>

<sup>4</sup> <https://www.semana.com/nacion/articulo/sequia-en-casanare-deja-20000-animales-muertos/381115-3>



Figura 2. Imágenes de Green Energy / Diario las comunas.

El uso del agua ha venido aumentando un 1% anualmente en todo el mundo desde los años 80, impulsado por una combinación de aumento de la población, desarrollo socioeconómico y el cambio en los modelos de consumo. Más de 2000 millones de personas viven en países que sufren una fuerte escasez de agua, y aproximadamente 4000 millones de personas una grave escasez de agua durante al menos un mes al año. Los niveles de escasez seguirán aumentando a medida que crezca la demanda de agua y se intensifiquen los efectos del cambio climático (Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019, “No Dejar a Nadie Atrás”).

Además de ser necesaria para el consumo humano, también resulta fundamental en la mejora de la producción agrícola con la implementación de sistemas de riego y en la producción ganadera y pecuaria en general. Ante esta situación, las fuentes renovables juegan un papel importante en el desarrollo de sistemas de bombeo sostenibles

### MARCO CONCEPTUAL:

El IDEAM, y la OMM (Organización Meteorología Mundial), entre otras redes de estaciones meteorológicas públicas y privadas, constantemente están generando y actualizando las bases de datos, aportando a la calibración y validación de la información radiométrica en el territorio nacional, además, con el apoyo de la UPME y Colciencias se obtiene el Atlas de radiación Solar y

de energía eólica, los cuales constituyen hoy día los recursos renovables más limpios para la generación de energía eléctrica<sup>5</sup>.

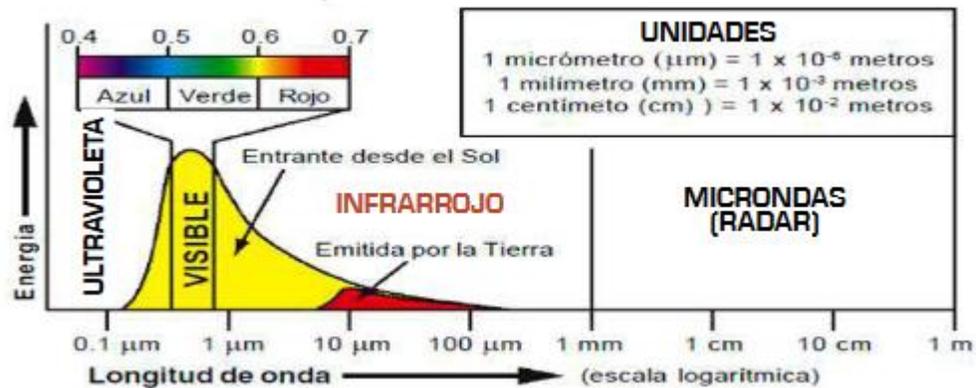


Figura 3. Imagen. ENVIV4.5

Radiación solar: Es la energía emitida por el Sol, esta se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y se genera en las reacciones del hidrógeno en el núcleo del Sol por fusión nuclear, también, es emitida por la superficie solar. La radiación solar es variable de acuerdo a la hora en el día, que puede variar de 6am a 6pm de forma considerada, así como por diferentes perturbaciones de orden climática, etc.



Figura 4. Imagen prensa libre Casanare, el heraldo, caracol radio

Celdas solares, también llamada célula solar fotovoltaica, es el elemento que nos va a permitir convertir la energía solar en energía eléctrica mediante un proceso fotoeléctrico, comúnmente se fabrican en silicio y en tres tipos, como lo son, mono cristalinos, policristalinos y amorfos o de

<sup>5</sup> <http://www.andi.com.co/Uploads/RADIACION.compressed.pdf>

capa fina; los cuales se identifican por sus características constructivas y la eficiencia que manejan. De estos parámetros se definen distintivos como el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ), voltaje de máxima potencia ( $V_{mpp}$ ), corriente de máxima potencia ( $I_{mpp}$ ), eficiencia de conversión ( $\eta$ ), factor de llenado ( $FF$ )<sup>6</sup>, este último nos indica la eficacia de la celda y se formula por medio de la relación entre la potencia máxima generada por la celda y el producto  $I_{sc} V_{oc}$ <sup>7</sup>, (Meyer, Edson; Van Dyk, Eugene Ernest, 2001; Salamanca, Jorge Enrique, 2012.)

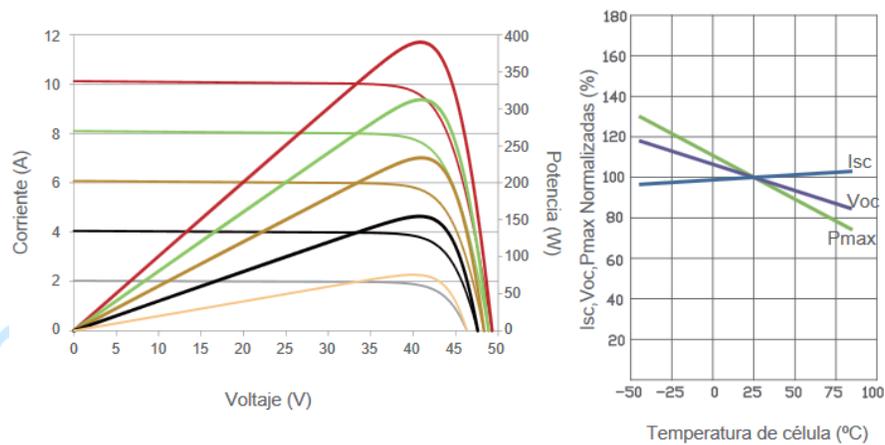


Figura 5. Imagen. Jinkosolar (rendimiento del módulo fotovoltaico)

En los sistemas fotovoltaicos utilizados para alimentar cargas en corriente alterna, se hace imprescindible el uso de inversores de frecuencia, ya que los paneles solares generan energía en corriente directa y el uso se hace en componente alterna [1],[2].

La conversión de la potencia eléctrica de componente directa a componente alterna, busca a partir de fuentes de corriente directa obtener ondas de corriente alterna para alimentar máquinas de AC (corriente alterna) a partir de estrategias llamadas PWM [3], estas técnicas conllevan problemas de distorsión armónica y de conmutación [4],[5].

<sup>6</sup> <http://www.isolari.es/tipos-de-placas-fotovoltaicas>

<sup>7</sup> [https://www.researchgate.net/publication/286630155\\_Monitoring\\_Isc\\_Voc\\_and\\_performance\\_parameters\\_of\\_photovoltaic\\_modules](https://www.researchgate.net/publication/286630155_Monitoring_Isc_Voc_and_performance_parameters_of_photovoltaic_modules)

Para solucionar estos problemas y conseguir una forma de onda de tensión que se acerque más a una onda sinusoidal pura, con el mínimo de conmutaciones de los dispositivos de potencia, aparece una nueva familia de inversores, llamados inversores multinivel [6][7][8].

Para acercar aún más las formas de ondas de las tensiones de los inversores multinivel a ondas sinusoidales puras, se han realizado múltiples trabajos de optimización del contenido armónico[12], [13], [14] estos trabajos buscan eliminar los armónicos, ya sea en ordenes selectivos[15][16] o en una banda determinada[17], sin embargo no se llega a un punto óptimo definitivo, por lo que el tema es trabajo de investigación.

Otro problema de la conversión CD/AC en los sistemas fotovoltaicos, es la variación de la tensión en términos de los cambios de carga y fluctuaciones del bloque acumulador o de los paneles solares de donde el inversor toma la energía[15]<sup>8</sup>. En inversores la regulación de tensión puede causar que las tensiones de salida salgan de los límites establecidos para conservar la calidad de la energía suministrada a la carga.

Es por esto que en este trabajo se quiere implementar un prototipo de inversor multinivel resultado de las investigaciones del grupo de automatización y un control que utilice un convertidor CD/CD que permita regular el valor RMS del voltaje de salida del inversor mediante el control inteligente de la tensión del bus de DC. (Pavón, Luis; Caicedo, Edison, Rodríguez, Jorge, Pardo, Aldo, 2019)

En este trabajo se pueden usar motores sumergibles GM, los cuales tienen las características técnicas para poder llevar a cabo la investigación.

---

<sup>8</sup> [https://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijps/2019/010-0004\(2019\).pdf](https://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijps/2019/010-0004(2019).pdf)

Tabla No 1. Características técnicas de motores GM

POTENCIA									
HP	KW	VELOCIDAD NOMINAL	BRIDA NEMA	RENDIMIENTO ESTADO DE CARGA 100%	COSENO FI ESTADO DE CARGA 100%	INTENSIDAD DE CORRIENTE NOMINAL 380 V	CARGA AXIAL	LARGO EN MM	PESO EN KG
7,5	5,5	2900 RPM	4" - 6"	75,9	0,83	13	32	636	38
10	7,5	2900 RPM	4" - 6"	76,5	0,91	16	32	681	42
12,5	9,2	2860 RPM	4"	76,2	0,91	20	32	731	44
15	11	2860 RPM	6"	79	0,9	24	32	776	48
20	15	2820 RPM	6"	76,9	0,92	31	32	876	58
25	18,5	2850 RPM	6"	80,8	0,9	38	32	876	58
30	22	2860 RPM	6"	81,4	0,86	48	32	876	58

Inversor de frecuencia trifásico multinivel: Es conocido también como drivers de frecuencia ajustable (AFD) o variador de velocidad, ya que es usado para controlar la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna. Gracias a este dispositivo electrónico, es posible variar la velocidad rotacional de un motor, actuando sobre la frecuencia y el voltaje de la alimentación, siendo la carga tipo bomba una de las más utilizadas en este tipo de instalación, solución eficaz para mejorar la eficiencia energética, reducir el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono.

### CONCLUSIONES:

Se demuestra que se hace necesario un  **acondicionador de potencia**  para sistemas FV en corriente alterna.

El convertidor CD/CD, permite regular el valor RMS del voltaje de salida mediante el control de la tensión del bus de DC, de esta manera se realiza un lazo de control inteligente.

### BIBLIOGRAFÍA

Aashoor, F. A. O., & Robinson, F. V. P. (2014). Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Water Pumping System Using Artificial Neural Based Controller. The 3rd Renewable Power Generation Conference (RPG), 1–6. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0884>

AB Niño., (2018), Micro turbina Peltón, una solución real de energía para zonas no

- interconectadas (ZNI). *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257.
- Aliyu, M., Hassan, G., Said, S. A., Siddiqui, M. U., Alawami, A. T., & Elamin, I. M. (2018). A review of solar-powered water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 87(March 2017), 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.010>
- Andoulssi, R., Draou, A., Jerbi, H., Alghonamy, A., & Khiari, B. (2013). Non linear control of a photovoltaic water pumping system. *Energy Procedia*, 42, 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.033>
- Autogeneración a pequeña escala y generación distribuida.
- Benghanem, M., Daffallah, K. O., Joraid, A. A., Alamri, S. N., & Jaber, A. (2013). Performances of solar water pumping system using helical pump for a deep well: A case study for Madinah, Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, 65, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.013>
- Cepeda, J., & Sierra, A. (2016). Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones, 10.
- Contreras, W., Galban, M. G., & Sepúlveda, S. B. (2018). Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta . *Entre Ciencia e Ingeniería* . scieloco
- CREG 026. (2018). Documento CREG 026. Análisis de comentarios a la resolución CREG 121 de 2017.
- CREG 066. (2017). Documento CREG 066. Autogeneración a Pequeña escala y generación distribuida. C. CREG No. 030 (2018). Colombia: Diario Oficial No. 50522.
- CSH Tolosa, BC Eugenio., (2017), Desarrollo de libros electrónicos: “taller pedagógico”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257
- Elimination for Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(2), 1579–1590. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2548080>
- Enrique, J. M. (2011). Diseño, modelado y optimización de sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia de generadores fotovoltaicos mediante convertidores CC/CC.
- Gupta, M. K., & Jain, R. (2013). Mppt simulation with dc submersible solar pump using output

- sensing direct control method and cuk converter. *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(1), 186–191. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84881042574&partnerID=40&md5=dd295b053a192a0aef7f362be6213e37>
- International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 10(1), 137–152. Retrieved from <https://waset.org/Publications/a-review-on-impacts-of-grid-connected-pv-system-on-distribution-networks/10003919>
- J Pérez, J Castro., (2018), LRS1: Un robot social de bajo costo para la asignatura “Programación 1”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257.
- Jamil, M. (2012). SPV based water pumping system for an academic institution. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1(1), 1.
- Kappali, M., Uday Kumar, R. Y., & Sheelavant, V. R. (2013). Harnessing Maximum Power from Solar PV Panel for Water Pumping Application (pp. 236–241). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35864-7\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35864-7_33)
- Malla, S. G., Bhende, C. N., & Mishra, S. (2011). Photovoltaic based water pumping system. In 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEAS.2011.6147148>
- Meyer, E., Van Dyk, E. E., (
- Mishra, A. K., & Singh, B. (2018). Design of solar-powered agriculture pump using new configuration of dual-output buck–boost converter. *IET Renewable Power Generation*, 12(14), 1640–1650. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5258>
- Nath, S. R., & Mandal, R. (2017). Some studies on performance analysis of two different laboratory scale solar photovoltaic water pumping in irrigation systems. *International Conference on 21st Century Energy Needs - Materials, Systems and Applications, ICTFCEN 2016*, (March 2015), 0–3. <https://doi.org/10.1109/ICTFCEN.2016.8052739>
- Ordóñez Plata, G., Duarte, C., & Petit Suárez, J. (2018). Método y sistema de irrigación inteligente de paneles fotovoltaicos integrados con techos verdes. Colombia. Retrieved

from WO2017187420A1

- Parvathy S., & Vivek A. (2015). A photovoltaic water pumping system with high efficiency and high lifetime. In 2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy) (pp. 489–493). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2015.7229668>
- Pavón, L. D., Caicedo, E., Rodríguez, J. L., Pardo, A. G. (2019). Power Conditioner for a PV Systems in The Alternating Current
- Rohit, K. B., Karve, G. M., & Khatri. (2013). Solar Water Pumping system. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90007-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90007-5)
- Salamanca, J. E., (2012). Celdas fotovoltaicas de alta eficiencia y sistema de paneles solares del cubesat Colombia 1
- Shabaan, S., Abu El-Sebah, M. I., & Bekhit, P. (2018). Maximum power point tracking for photovoltaic solar pump based on ANFIS tuning system. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 5(1), 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2018.02.002>
- Singh, B., & Kumar, R. (2016). Solar PV array fed brushless DC motor driven water pump. 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems, ICPS 2016, 0–4. <https://doi.org/10.1109/ICPES.2016.7584057>
- Subashini, M., & Ramaswamy, M. (2016). A novel design of charge controller for a standalone solar photovoltaic system. 2016 3rd International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2016, 237–243. <https://doi.org/10.1109/ICEES.2016.7510647>
- T Velásquez, E Espinel, G Guerrero (2016). Estrategias pedagógicas en el aula de clase. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, ISSN: 1692-7257.
- Tafti, H. D., Maswood, A. I., Konstantinou, G., Pou, J., & Acuna, P. (2018). Active/reactive power control of photovoltaic grid-tied inverters with peak current limitation and zero active power oscillation during unbalanced voltage sags. IET Power Electronics, 11(6), 1066–1073. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0210>

- Tobnaghi, D. M. (2016). A Review on Impacts of Grid-Connected PV System on Distribution Networks.
- Villamizar, K. (2019, January 29). Norte de Santander, a mitad de camino hacia la innovación. La Opinión. Retrieved from <https://www.laopinion.com.co/economia/norte-de-santander-mitad-de-camino-hacia-la-innovacion-170322#OP>
- Villan Bustamante, D. (2018, September 6). El primer edificio en Cúcuta que funciona con energía solar. La Opinión. Retrieved from <https://www.laopinion.com.co/economia/el-primer-edificio-en-cucuta-que-funciona-con-energia-solar-161622#OP>
- Yan, R., Roediger, S., & Saha, T. K. (2011). Impact of photovoltaic power fluctuations by moving clouds on network voltage: A case study of an urban network. In AUPEC 2011 (pp. 1–6).
- Yang, K., Zhang, Q., Zhang, J., Yuan, R., Guan, Q., Yu, W., & Wang, J. (2017). Unified Selective Harmonic
- Yang, Y., Zhou, K., & Blaabjerg, F. (2016). Current Harmonics From Single-Phase Grid-Connected Inverters—Examination and Suppression. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(1), 221–233. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2504845>
- Zahab, E. E. A., Zaki, A. M., & El-sotouhy, M. M. (2016). Design and control of a standalone PV water pumping system. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 4(2), 322–337. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.03.003>
- Zhang, X., Zhao, T., Mao, W., Tan, D., & Chang, L. (2018). Multilevel Inverters for Grid-Connected Photovoltaic Applications: Examining Emerging Trends. *IEEE Power Electronics Magazine*, 5(4), 32–41. <https://doi.org/10.1109/MPEL.2018.2874509>
- Zhang, X., Zhao, T., Mao, W., Tan, D., & Chang, L. (2018). Multilevel Inverters for Grid-Connected Photovoltaic Applications: Examining Emerging Trends. *IEEE Power Electronics Magazine*, 5(4), 32–41. <https://doi.org/10.1109/MPEL.2018.2874509>