30 Años 11 Años CID TecLerdo
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Revista digital universitaria
Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Implementación de un Sistema de Bombeo de Agua para Regiones Rurales Alimentado Mediante Energía Solar

Lara-Cardoso, J.[1]; Hernández-Flores, C.[2]; Arjona-López, M. A.[3]

Datos de Adscripción:

[1] ✉ Jorge Lara Cardoso. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Departamento de Posgrado. jorge_lara_c@yahoo.com. https://orcid.org/0000-0002-2746-7044

[2] Concepción Hernández Flores. TNM Instituto Tecnológico de La Laguna. División de Estudios de Posgrado e Investigación. coni.hernandez@ieee.org. https://orcid.org/0000-0002-4757-5309

[3] Marco Antonio Arjona López. TNM Instituto Tecnológico de La Laguna. División de Estudios de Posgrado e Investigación. marjona@ieee.org. https://orcid.org/000-0003-1826-4066

Resumen **- Este trabajo presenta la implementación de un sistema de bombeo de agua para ser utilizado en regiones rurales sin acceso a la red eléctrica, el cual se alimenta puramente con energía solar a través de paneles fotovoltaicos. El sistema global consiste de un arreglo fotovoltaico, un convertidor elevador de voltaje (boost), un inversor con topología multinivel, un banco de baterías de ácido-plomo y una bomba de agua basada en un motor monofásico de inducción. El convertidor boost permite operar el arreglo fotovoltaico en su punto óptimo de voltaje-corriente para así extraer siempre el máximo de potencia a pesar de las variaciones de irradiancia solar y temperatura. El correcto funcionamiento del sistema de bombeo solar se ha validado en simulación con el software de Matlab-Simscape. Diversas pruebas bajo diferentes condiciones de irradiancia solar y velocidad del motor se han llevado a cabo. Los resultados demuestran la viabilidad y confiabilidad del sistema de bombeo para funcionar de manera autosuficiente con la energía generada por los paneles fotovoltaicos y la almacenada en las baterías. El sistema de bombeo de agua desarrollado representa una solución muy atractiva al tener la gran ventaja de no depender de la red eléctrica y ser capaz de funcionar en regiones rurales.**

Palabras Clave **– Batería, Energía Solar, Inversor Multinivel, Motor de Inducción, Panel Fotovoltaico, Sistema de Bombeo de Agua.**

Abstract **- This work presents the implementation of a water pumping system designed for rural areas without access to the electrical grid, powered entirely by solar energy through photovoltaic panels. The system comprises a photovoltaic array, a voltage boost converter, a multilevel inverter, a lead-acid battery bank, and a water pump driven by a single-phase induction motor. The boost converter enables operation of the photovoltaic array at its optimal voltage-current point, ensuring maximum power extraction despite variations in solar irradiance and temperature. The performance of the solar pumping system was validated through simulations using Matlab-Simscape. Tests were conducted under various conditions of solar irradiance and motor speed. Results demonstrate the system's feasibility and reliability, showing that it can operate self-sufficiently using energy generated by the photovoltaic panels and stored in the batteries. The developed water pumping system offers a practical and sustainable solution for rural regions, with the significant advantage of functioning independently of the power grid.**

Keywords **- Battery, Induction Motor, Multilevel Inverter, Photovoltaic Panel, Solar Energy, Water Pumping System.**

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de bombeo utilizados en regiones donde no hay acceso a la red eléctrica están comúnmente basados en generadores eléctricos que funcionan con combustibles fósiles, e.g., diesel o gasolina. Sin embargo, el uso de estos combustibles resulta costoso incluso a corto plazo, representan un peligro constante al tenerlos almacenados y generan gases de efecto invernadero (Stonier et al., 2021). Con el objetivo de eliminar el riesgo, reducir el costo de operación del sistema de bombeo, contribuir al medio ambiente y tener una mejor calidad del aire, el uso de fuentes de energía renovable como la eólica y la solar fotovoltaica (Yussif et al., 2021) representa una solución muy atractiva. A diferencia del recurso eólico, el cual es limitado en muchas regiones, el recurso solar es abundante y provee de manera más constante la potencia requerida en un sistema de bombeo.

Los sistemas de bombeo basados en energía solar fotovoltaica pueden incluir o no una batería, la cual permite almacenar el exceso de energía generada por el arreglo de paneles fotovoltaicos, y poder mantener funcionando de manera continua el sistema de bombeo aun cuando la energía generada no es suficiente (Kodji et at., 2018), e.g., durante la presencia de nubes o incluso durante la noche (Bukhari et al., 2025). Aunque el sistema sin batería es menos costoso, tiene la desventaja de presentar oscilaciones de potencia, lo que hace variar el voltaje de su bus de DC. Además, requiere de algoritmos más complejos para llevar a cabo de manera simultánea tanto el seguimiento del punto de máxima potencia (SPMP) (MPPT - Maximum Power Point Tracking) como el control del motor de la bomba.

Los sistemas de bombeo pueden estar basados en diferentes tipos de motores, e.g., de imanes permanentes (PM), síncronos de reluctancia (SynRM), de reluctancia conmutada (SRM), de inducción (IM), de corriente directa (DCM) (Caracas et al., 2014), (Mao et at., 2008), entre otros. Sin embargo, el motor de inducción tiene un menor costo, es prácticamente libre de mantenimiento y presenta una mayor robustez (Altimania et al., 2023).

En los sistemas de bombeo no se requiere de una gran respuesta dinámica, por lo que el control escalar es una técnica viable, pues es eficiente y tiene un aceptable desempeño para regular la velocidad del motor de inducción. A pesar de su pequeño error en estado estable, tanto su simplicidad como su no dependencia de los parámetros del motor, la posiciona en la presente aplicación por encima de técnicas como el control directo de

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID099

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

torque (DTC - Direct Torque Control) y el control orientado en campo (FOC - Field Oriented Control) (Saady et al., 2021), (Santhosh et al., 2018).

Este trabajo presenta la implementación de un sistema de bombeo de agua para ser utilizado en regiones rurales sin acceso a la red eléctrica. El sistema de bombeo propuesto se alimenta con energía solar a través de paneles fotovoltaicos e integra una batería para el almacenamiento de energía. La bomba de agua está basada en un motor de inducción monofásico con dos bobinados, i.e., el principal y el auxiliar de marcha. El elevador de voltaje implementa el algoritmo de SPMP, mientras que el inversor provee una señal de voltaje de tres niveles con determinada magnitud y frecuencia en base al control escalar del motor.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: la sección II describe los elementos que integran el sistema de bombeo. i.e., el panel fotovoltaico, el convertidor elevador de voltaje CD-CD, el banco de baterías de ácido-plomo, el inversor multinivel de voltaje CD-CA y la bomba de agua basada en un motor de inducción. Aquí también se presenta el modelo del motor de inducción monofásico con bobinado auxiliar en el marco de referencia dq, así como la estrategia de control escalar utilizada. La sección III presenta y discute los resultados de simulación obtenidos en el software de Matlab-Simscape, donde se muestran las curvas de diversas variables del sistema durante su funcionamiento ante cambios en la velocidad del motor de la bomba y en la irradiancia solar. Finalmente, en la sección IV, se presentan las conclusiones y algunas observaciones importantes.

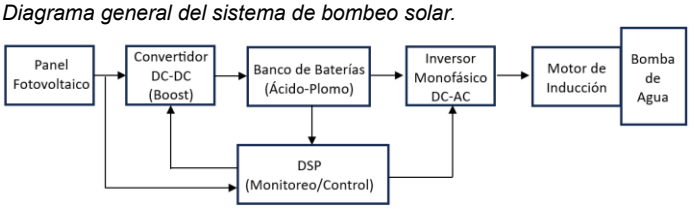
II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

En esta sección se describen todos los elementos que integran el sistema de bombeo de agua basado en energía solar.

La Figura 1 muestra el diagrama global simplificado del sistema de bombeo implementado en este trabajo, mientras que la Figura 2 muestra el esquema detallado del sistema equivalente simulado en el software de Matlab-Simscape. Este sistema consiste en un panel fotovoltaico, un convertidor elevador de voltaje DC-DC, un banco de baterías, un inversor monofásico DC-AC con una topología multinivel, un microcontrolador y una bomba de agua acoplada a un motor de inducción.

Figura 1

Diagrama general del sistema de bombeo solar.

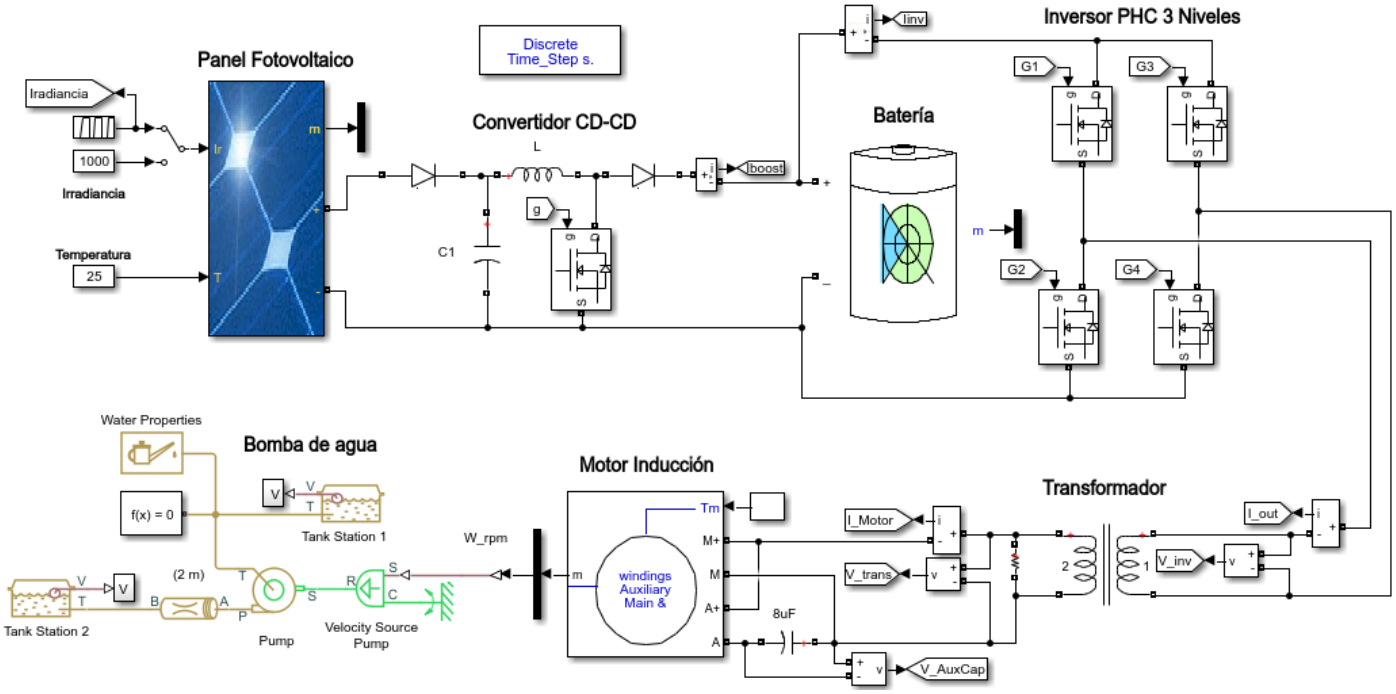


2.1 Panel Fotovoltaico

El panel fotovoltaico utilizado es el modelo BCT20-12 de la compañía Blue Carbon Technology Inc. Los principales parámetros de este módulo de 20 W se muestran en la Figura 3, la cual es una ventana de configuración en el software de Matlab-Simscape. Observe que el voltaje y la corriente en el punto de máxima potencia son 17.2 V y 1.16 A, respectivamente.

Figura 2

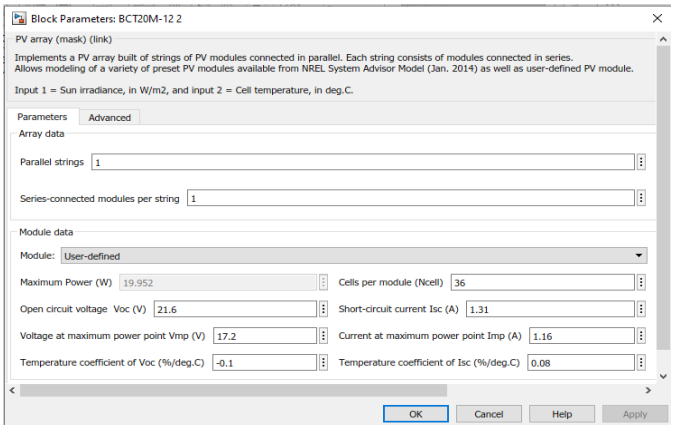
Esquema del sistema de bombeo de agua simulado en Matlab-Simscape.



https://doi.org/10.62805/cid2025.CID099
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

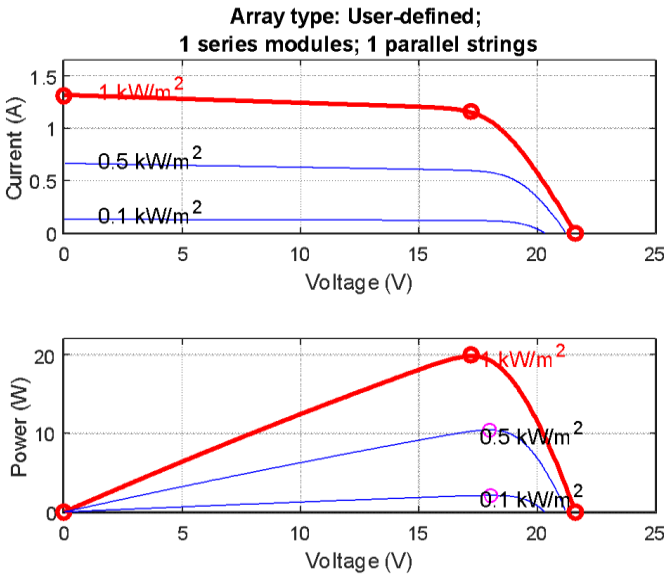
Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Figura 3
Parámetros del módulo BCT20-12 en Matlab-Simscape.



La Figura 4 muestra las curvas características de voltaje-corriente (V-I) y voltaje-potencia (V-P) del módulo BCT20-12 a una temperatura constante de 25 C para tres diferentes niveles de irradiancia solar, i.e., 100 W/m^2, 500 W/m^2 y 1,000 W/m^2.

Figura 4
Curvas características del módulo BCT20-12 en Matlab- Simscape.



2.2 Convertidor elevador de voltaje CD-CD

El convertidor elevador (boost) de voltaje consiste de un interruptor de potencia, (en este caso un MOSFET: Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor), un inductor y un diodo. El voltaje de salida se determina en función del voltaje de entrada V_i y del ciclo de trabajo D como (Vidaña et al., 2023):

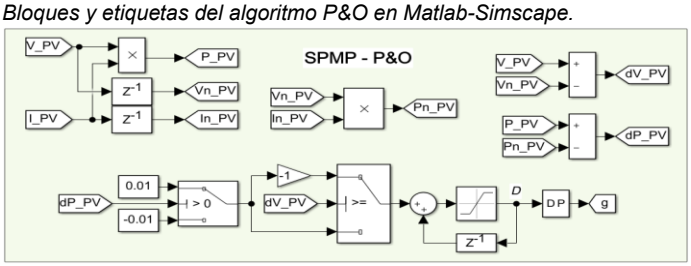
$$V_o = \frac{1}{1 - D} V_i \qquad (1)$$

Considerando que el voltaje a la salida del boost está fijado por el voltaje del banco de baterías (36 V), entonces al variar D lo que se modifica es su voltaje de entrada equivalente al voltaje de salida del módulo fotovoltaico. Este principio de control es el que permite la implementación del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (SPMP), el cual consigue operar el módulo fotovoltaico en el punto óptimo, i.e., donde el producto de su voltaje y corriente de salida es máximo. Es importante mencionar que este algoritmo SPMP se debe ejecutar en tiempo real pues se requiere tanto monitorear como adaptar continuamente el punto de operación del panel en función de las variaciones de irradiancia solar y de temperatura, como se muestra en las curvas características de la Figura 4.

El algoritmo SPMP implementado en este trabajo es el de perturbación y observación (P&O), el cual tiene las ventajas de una implementación sencilla y un buen desempeño. Los detalles y la explicación de este algoritmo se pueden consultar en (Vidaña et al., 2022).

La Figura 5 muestra gráficamente el algoritmo SPMP de P&O implementado con bloques en Matlab-Simscape. Observe cómo se calcula la potencia actual y se compara con la potencia anterior para así determinar la próxima dirección (signo) de la perturbación de voltaje, cuya magnitud se ha ajustado a 10 mV. Este valor permite un equilibrio aceptable entre la rapidez de seguimiento y la tolerancia de las oscilaciones en el punto máximo. Es importante mencionar que las entradas del algoritmo son el voltaje (V_PV) y la corriente (I_PV) del panel, mientras que la salida es el ciclo de trabajo D, el cual se envía directamente al generador PWM DC-DC y a la compuerta g del MOSFET que forma parte del convertidor boost.

Figura 5
Bloques y etiquetas del algoritmo P&O en Matlab-Simscape.



2.3 Banco de Baterías

Las baterías de ácido-plomo utilizadas en el sistema de bombeo permiten mantener funcionando la bomba aun cuando la irradiancia solar de día sea insuficiente o incluso durante la noche. El modelo de batería es AM-58-575, la cual tiene un voltaje de salida de 12 V. El banco de baterías implementado consiste de tres de estas baterías conectadas en serie, teniendo así un bus de voltaje de 36 V.

La Figura 6 muestra las curvas de descarga del banco de baterías para tres diferentes corrientes. Observe como si se consumen 1 A, 5 A y 10 A de corriente de manera continua, se experimenta una caída de voltaje de 11V, i.e., de 36 V a 25 V, en aproximadamente 10 hrs, 2 hrs y 1 hr, respectivamente. Esta gráfica es muy importante ya que nos permite estimar el tiempo de funcionamiento del sistema de bombeo cuando el módulo fotovoltaico no está generando energía.

2.4 Inversor Multinivel de Voltaje CD-CA

El inversor de voltaje utilizado en el sistema de bombeo está basado en una topología de puente H en cascada (PHC) o CHB-Cascaded H-Bridge, por sus siglas en inglés. Este inversor se compone de dos brazos con dos interruptores de potencia cada

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID099

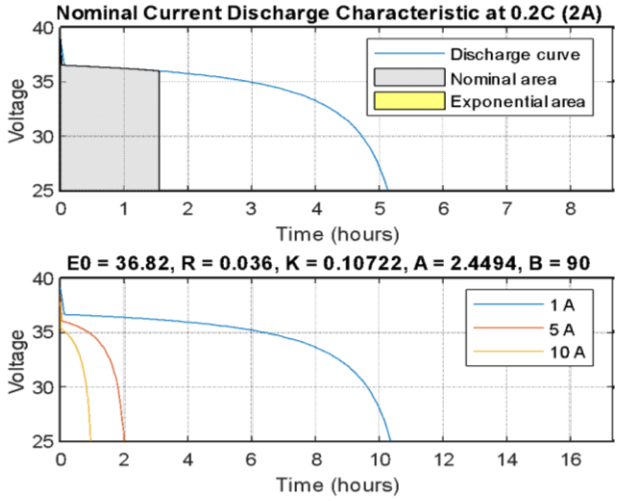
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

uno de ellos, lo que da un total de cuatro. Los interruptores de cada brazo conmutan de manera complementaria, evitando así un corto circuito del bus de DC (Díaz et. al., 2024).

La Figura 7 muestra el diagrama general de la técnica de modulación de ancho de pulso - MAP (PWM – Pulse Width Modulation) implementada en Matlab-Simscape para controlar el inversor PHC, mientras que la Figura 8 muestra los bloques contenidos en su interior. Esta estrategia de modulación se basa en una sola señal triangular portadora que permite obtener un voltaje de salida de 3 niveles, i.e., +V, 0 y -V. Observe que las etiquetas G2 y G4 son complementarias de G1 y G3, respectivamente.

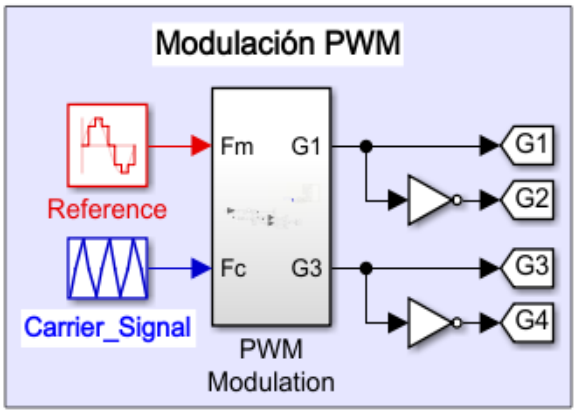
Figura 6
Curvas de descarga del banco de baterías en Matlab-Simscape.



2.5 Bomba de Agua basada en un Motor de Inducción

La bomba de agua utilizada en el prototipo tiene una potencia de 1/6 HP, es de uso agrícola, cuenta con una protección IP44 y pertenece a la clase F PN10. Además, tiene un diseño CE que permite inspeccionar y reparar la unidad giratoria sin necesidad de desconectar las tuberías.

Figura 7
Diagrama de modulación PWM para el inversor PHC.



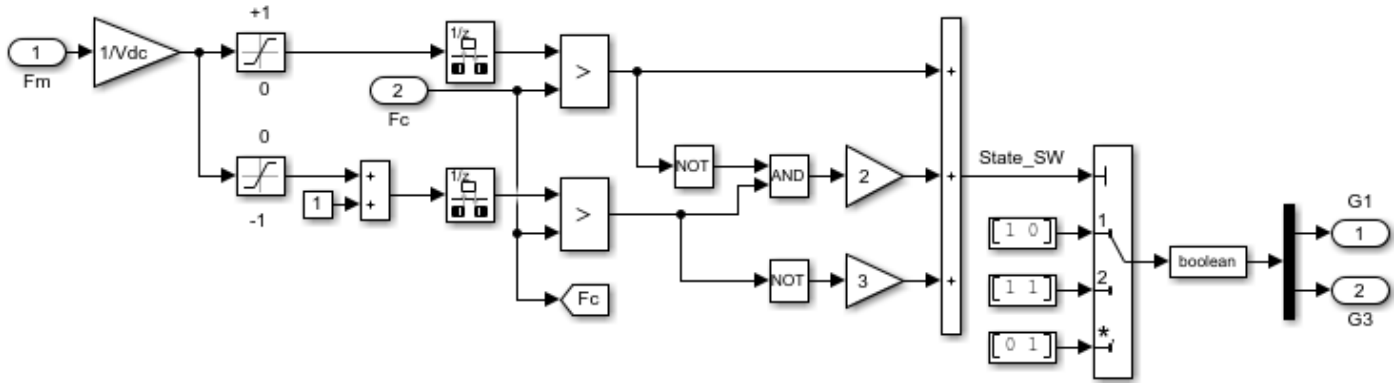
La Tabla 1 muestra los parámetros principales de la bomba de agua.

Tabla 1
Parámetros de la bomba de agua.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Potencia máxima	120	W
Voltaje nominal	127	V
Frecuencia	60	Hz
Capacitor interno	8	µF
Ruido acústico	≤ 45	dB
Flujo máximo	30	lt/min
Altura máxima	9	m

De acuerdo con el fabricante, el flujo máximo que alcanza la bomba es de 30 lt/min. Sin embargo, es importante mencionar que este flujo solo se logra cuando el bombeo se realiza a nivel de piso, i.e., a una altura cero. La bomba utilizada en el sistema tiene un flujo de 20 lt/min a 3 m de altura, de 12 lt/min a 6 m de altura, y de 1 lt/min a una altura máxima de 9 m. Así, conforme aumenta la altura de bombeo, el flujo disminuye (MATLAB-Simscape HELP, Febrero 2025).

Figura 8
Bloques contenidos al interior de la modulación PWM mostrada en la Figura 7.



https://doi.org/10.62805/cid2025.CID099

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

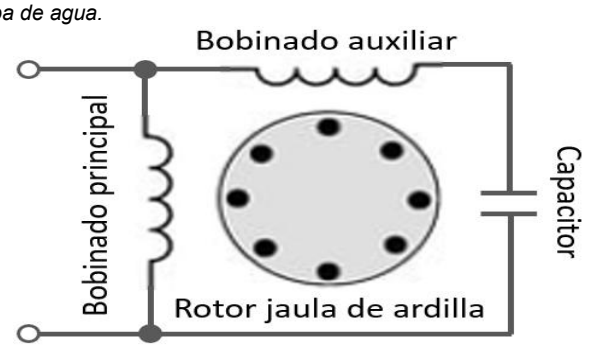
2.6 Control Escalar del Motor de Inducción

El control escalar también denominado V/f (voltaje/frecuencia o Volt/Hz) es un método de lazo abierto que permite regular de manera sencilla y eficiente la velocidad de un motor de inducción, siempre que ésta no sobrepase su valor nominal (Angadi et al., 2021). El principio de funcionamiento de esta técnica es lograr un flujo constante en el estator, lo cual se obtiene manteniendo la relación de voltaje y frecuencia (MATLAB-Simscape HELP, Abril 2025). Esta técnica presenta limitaciones de control pues no tiene retroalimentación y puede ser inestable para torques externos grandes, a altas velocidades o bien ante variaciones rápidas de velocidad o torque. Sin embargo, en aplicaciones de bombeo de agua donde el punto de operación de velocidad y torque del motor es prácticamente constante, el control escalar es una opción muy atractiva pues no requiere de sensores y es menos compleja.

La Figura 9 muestra los bobinados principal y auxiliar de marcha del estator del motor de inducción de la bomba de agua (Santhosh et al., 2018). Observe que el capacitor conectado en serie con el bobinado auxiliar contribuye a generar una segunda fase desfasada 90°, lo que permite generar un mayor torque, una mejor eficiencia y un funcionamiento más estable.

Figura 9

Bobinados principal y auxiliar de marcha del motor de inducción de la bomba de agua.



2.7 Modelo del motor de inducción monofásico con bobinado auxiliar en el marco de referencia dq

En esta subsección se presenta el modelado del motor asíncrono con bobinado auxiliar en el marco de referencia giratorio (dq).

Los voltajes del estator $\vec{V}_{ds}$ y $\vec{V}_{qs}$ en coordenadas dq se expresan como (Krause et al., 1995), (MATLAB-Simscape HELP, Marzo 2025):

$$\vec{V}_{ds} = R_S\vec{I}_{ds} + \frac{d\,\vec{\Phi}_{ds}}{dt} \tag{2}$$

$$\vec{V}_{qs} = R_s\vec{I}_{qs} + \frac{d\,\vec{\Phi}_{qs}}{dt} \tag{3}$$

donde R_S y R_s son las resistencias de los bobinados auxiliar y principal del estator, $\vec{I}_{ds}$ e $\vec{I}_{qs}$ simbolizan las componentes directa d y en cuadratura q de la corriente del estator, mientras que $\vec{\Phi}_{ds}$ y $\vec{\Phi}_{qs}$ representan los flujos del estator.

Los voltajes del rotor $\vec{V}'_{dr}$ y $\vec{V}'_{qr}$ en coordenadas dq se expresan como:

$$\vec{V}'_{dr} = R'_R\vec{I}'_{dr} + \frac{d\vec{\Phi}'_{dr}}{dt} + (N_S/N_s)\omega_r\vec{\Phi}'_{qr} \tag{4}$$

$$\vec{V}'_{qr} = R'_r\vec{I}'_{qr} + \frac{d\vec{\Phi}'_{qr}}{dt} - (N_s/N_S)\omega_r\vec{\Phi}'_{dr} \tag{5}$$

donde R'_R y R'_r son las resistencias de los bobinados auxiliar y principal del rotor (en el presente modelo $R'_R = R'_r$), $\vec{I}'_{dr}$ e $\vec{I}'_{qr}$ representan las componentes directa d y en cuadratura q de la corriente del rotor, $\vec{\Phi}'_{dr}$ y $\vec{\Phi}'_{qr}$ son los flujos del rotor, ω_r simboliza la velocidad angular eléctrica, mientras que N_S y N_s definen el número de vueltas de los bobinados auxiliar y principal, respectivamente.

Los flujos magnéticos del estator y del rotor se pueden expresar en función de las inductancias total L_{SS} y de magnetización L_{mS} del bobinado auxiliar del estator, de las inductancias totales de los bobinados auxiliar L'_{RR} y principal L'_{rr} del rotor, y de las inductancias total L_{ss} y de magnetización L_{ms} del bobinado principal del estator como se indica a continuación:

$$\vec{\Phi}_{ds} = L_{SS}\vec{I}_{ds} + L_{mS}\vec{I}'_{dr} \tag{6}$$

$$\vec{\Phi}_{qs} = L_{ss}\vec{I}_{qs} + L_{ms}\vec{I}'_{qr} \tag{7}$$

$$\vec{\Phi}'_{dr} = L'_{RR}\vec{I}'_{dr} + L_{mS}\vec{I}_{ds} \tag{8}$$

$$\vec{\Phi}'_{qr} = L'_{rr}\vec{I}'_{qr} + L_{ms}\vec{I}_{qs} \tag{9}$$

Las inductancias totales también se pueden expresar en función de las inductancias de fuga de los bobinados auxiliar L_{lS} y principal L_{ls} del estator, de las inductancias de fuga de los bobinados auxiliar L'_{lR} y principal L'_{lr} del rotor, y de las inductancias magnetizantes como:

$$L_{SS} = L_{lS} + L_{mS} \tag{10}$$

$$L_{ss} = L_{ls} + L_{ms} \tag{11}$$

$$L'_{RR} = L'_{lR} + L_{mS} \tag{12}$$

$$L'_{rr} = L'_{lr} + L_{ms} \tag{13}$$

El torque electromagnético τ_e producido por el motor de inducción en función de las variables eléctricas viene dado por:

$$\tau_e = p\left[(N_S/N_s)\vec{\Phi}'_{qr}\vec{I}'_{dr} - (N_s/N_S)\vec{\Phi}'_{dr}\vec{I}'_{qr}\right] \tag{14}$$

y en función de las variables mecánicas está definido como:

$$\tau_e = 2H\frac{d\,\omega_m}{dt} + F\frac{d\,\theta_m}{dt} + \tau_m \tag{15}$$

donde p es el número de pares de polos, H representa la constante del momento de inercia combinado del rotor y la carga, F representa el factor de fricción viscosa y τ_m es el torque mecánico del eje, mientras que θ_m y ω_m son la posición mecánica y la velocidad angular mecánica del rotor, respectivamente.

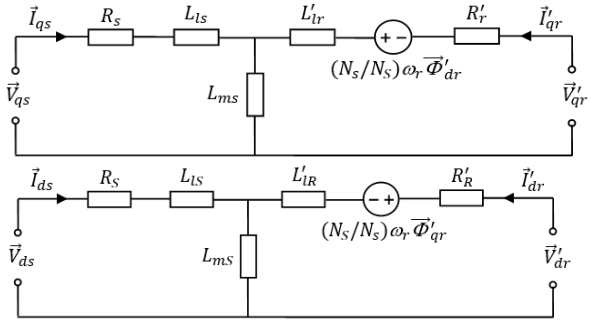
https://doi.org/10.62805/cid2025.CID099
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

La Figura 10 muestra los circuitos eléctricos equivalentes del modelo en base a las ecuaciones (2)-(13).

Figura 10

Circuito eléctrico resultante del modelado del motor de inducción monofásico. (Arriba) Bobinado principal eje q: $\vec{V}_{qs}$ y $\vec{V}'_{qr}$. (Abajo) Bobinado auxiliar eje d: $\vec{V}_{ds}$ y $\vec{V}'_{dr}$.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos al simular el sistema de bombeo solar de agua en el software de Matlab - Simscape.

La Figura 11 muestra las curvas de velocidad angular, torque, posición y las corrientes del estator (bobinados principal y auxiliar) del motor de inducción de la bomba, así como el voltaje del estator y el voltaje del inversor PHC. Observe como la velocidad del eje comienza desde el reposo hasta alcanzar alrededor de 3,550 rpm. A los 0.4 s, la bomba genera el torque máximo de 0.3 Nm, lo que reduce su velocidad a 2,690 rpm.

Figura 11

Curvas del motor de inducción obtenidas de la simulación del sistema de bombeo en Matlab-SimScape.

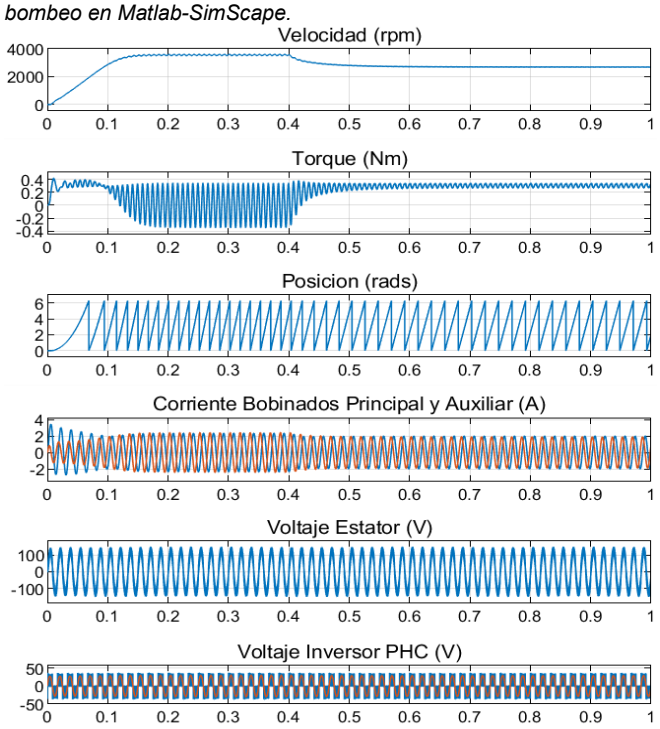
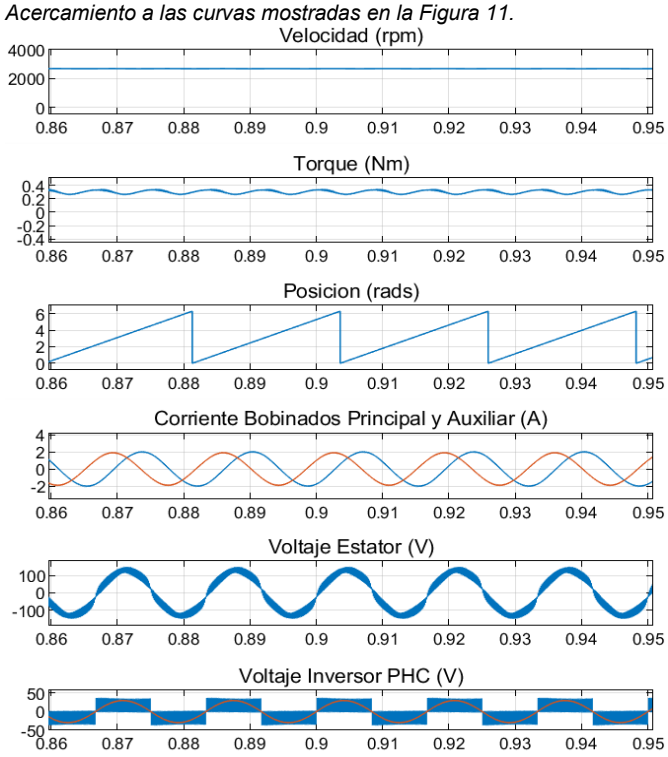


Figura 12

Acercamiento a las curvas mostradas en la Figura 11.



La Figura 12 muestra un acercamiento a las curvas de la Figura 11. Observe cómo las corrientes del bobinado principal y del bobinado auxiliar están correctamente defasadas 90°. También se pueden apreciar las pequeñas oscilaciones de torque, así como los 3 niveles del voltaje del inversor PHC, i.e., el voltaje positivo (+36 V) y negativo de la batería (-36 V) y cero.

La Figura 13 muestra las curvas de la corriente del panel fotovoltaico, la corriente del convertidor elevador, la corriente de la batería y la corriente a la entrada del inversor, así como el voltaje del módulo fotovoltaico y el voltaje de la batería. Observe como el cambio en la corriente del panel de 0.56 A a 1.14 A es debido al incremento en la irradiancia solar de 500 W/m^2 a 1,000 W/m^2.

La Figura 14 presenta un acercamiento a las curvas de la Figura 13. Observe las pequeñas oscilaciones del voltaje del panel fotovoltaico alrededor del punto de máxima potencia (17.2 V), así como el voltaje de la batería, el cual prácticamente permanece constante durante toda la prueba.

En condiciones iniciales (t = 0 s), el tanque de almacenamiento 1 (origen) tiene un volumen de 20 lts, mientras que el tanque de almacenamiento 2 (destino) está vacío.

En la Figura 15, se observa como el tanque de origen (azul) se vacía mientras que el tanque de destino (naranja) se llena, y en aproximadamente 50 s se alcanza tanto el drenado completo del tanque 1 como el llenado total del tanque 2, respectivamente. Estos datos indican que el flujo o caudal del sistema de bombeo solar es de 24 lts/min equivalente a 0.4 lts/s. Es importante mencionar que estas curvas se muestran solas y no se incluye ninguna otra de las demás variables del sistema de bombeo como las mostradas en las figuras anteriores, ya que la cantidad

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID099
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Figura 13
Curvas del módulo fotovoltaico, de la batería y del inversor obtenidas de la simulación del sistema de bombeo en Matlab-SimScape.

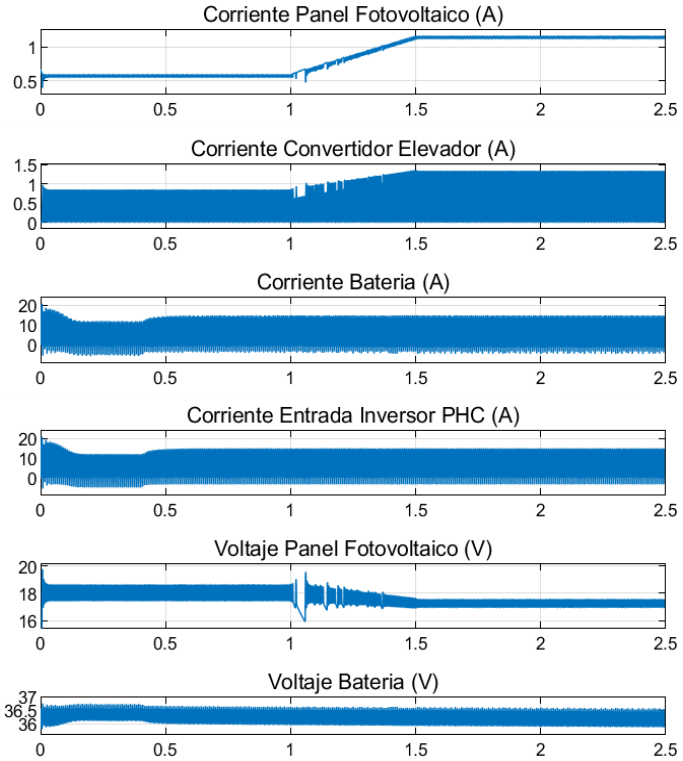


Figura 14
Acercamiento a las curvas mostradas en la Figura 13.

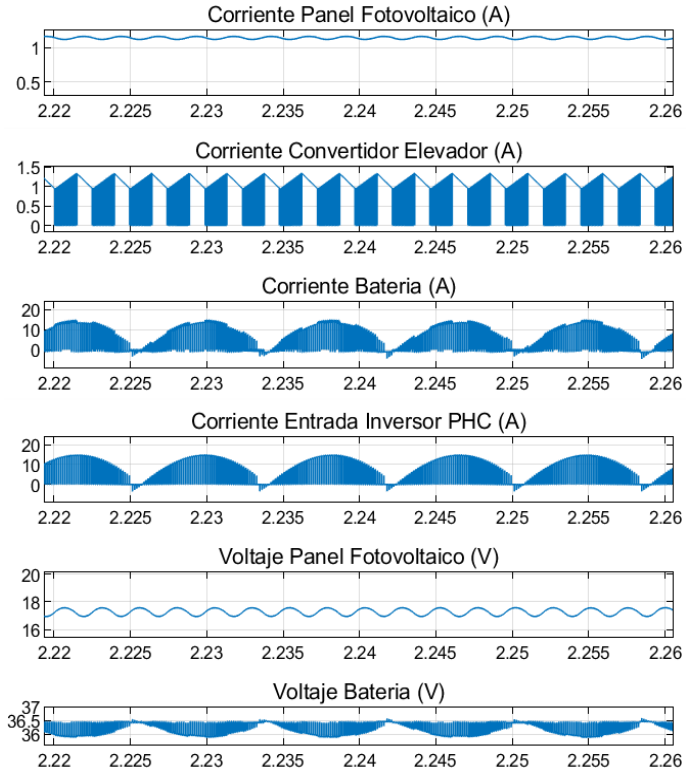
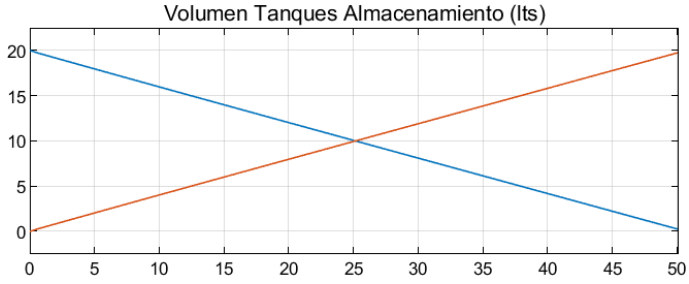


Figura 15
Curvas de drenado y llenado de los tanques de almacenamiento.



de información generada durante casi un minuto de simulación es demasiada y se satura la memoria RAM de la computadora.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado la simulación y las pruebas de un sistema de bombeo de agua basado en energía solar para ser utilizado en regiones rurales sin acceso a la red eléctrica.

El algoritmo SPMP de P&O utilizado, a pesar de ser uno de los más sencillos y fáciles de implementar, presentó un buen desempeño, al ser capaz de seguir apropiadamente el punto de máxima potencia durante los cambios de irradiancia solar. Ventajosamente, el uso del transformador elevador permitió realizar un correcto acoplamiento entre el inversor PHC y el motor de inducción de la bomba de agua, ya que la entrada del inversor estuvo fijada por las baterías a 36 V de directa, mientras que la bomba está dimensionada a trabajar con un voltaje nominal de 127 V de alterna. Por otro lado, el banco de baterías es de gran utilidad pues permite funcionar al sistema de bombeo durante condiciones de baja irradiancia solar e incluso durante la noche.

El tiempo requerido para transferir 20 lts del tanque de almacenamiento lleno al vacío fue de aproximadamente 50 s, equivalente a un flujo de 24 lts/min.

Los resultados obtenidos del sistema desarrollado de bombeo de agua basado en energía solar fotovoltaica y una batería química han demostrado su viabilidad para ser utilizado en regiones rurales donde no existe conexión a la red eléctrica de 127 V.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL) por el apoyo recibido para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

VI. REFERENCIAS

Altimania, M. R., Elsonbaty, N. A., Enany, M. A., Gamil, M. M., Alzahrani, S., Alraddadi, M. H., Alsulami, R., Alhartomi, M., Alghuson, M., Alatawi, F., y Mosaad, M. I. (2023). Optimal Performance of Photovoltaic-Powered Water Pumping System. *Mathematics*, 11(3), 1–21. https://doi.org/10.3390/math11030731

Angadi, S., Yaragatti, U. R., Suresh, Y., y Raju, A. B. (2021). Comprehensive Review on Solar, Wind and Hybrid Wind-PV Water Pumping Systems - An Electrical Engineering Perspective. *CPSS*

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID099

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Transactions on Power Electronics and Applications, 6(1), 1–19. DOI: 10.24295/CPSSTPEA.2021.00001

Bukhari, S. F. A., Kahveci, H., y Şahin, M. E. (2025). Single Phase Induction Motor Driver for Water Pumping Powered by Photovoltaic System. *Electronics*, 14(6), 1–19. https://doi.org/10.3390/electronics14061189

Caracas, J. V. M., Farias, G. de C., Teixeira, L. F. M., y Ribeiro, L. A. de S. (2014). Implementation of a High-Efficiency, High-Lifetime, and Low-Cost Converter for an Autonomous Photovoltaic Water Pumping System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(1), 631–641. https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2271214

Díaz, L. F., Lara, J., Hernández, C., y Arjona, M. A. (2024). Inversor CHB-7 con Capacidad de Múltiples Algoritmos MPPT Simultáneos en Sistemas Fotovoltaicos Asimétricos de Media Tensión. *Ingeniería Investigación y Tecnología - UNAM*, 25(2), 1–10. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.2.013

Kodji, D., Houdji, E. T., Djongyang, N., Ayang, A., y Tamba, J. G. (2018). An Investigation of Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Water Pumping System Performances. *Journal of Renewable Energies*, 21(3), 455–472. DOI: 10.54966/jreen.v21i3.704

Krause P.C., O. Wasynczuk, y S.D. Sudhoff. (1995). Analysis of Electric Machinery, *IEEE Press*.

Mao, M., Su, J., Liuchen, C., Zhang, G., y Lai, J. (2008). Research on the Performance of Induction-Motor-Based Residential Photovoltaic Water Pump System. *2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 1867–1870. DOI: 10.1109/CCECE.2008.4564868

MATLAB-SimScape HELP. (Febrero de 2025). Centrifugal Pump, *MathWorks Inc.*, https://la.mathworks.com/help/hydro/ref/centrifugalpump.html

MATLAB-Simscape HELP. (Marzo de 2025). Single Phase Asynchronous Machine, *MathWorks Inc.*, https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/singlephaseasynchronousmachine.html

MATLAB-Simscape HELP. (Abril de 2025). Run 3-Phase AC Motors in Open-Loop Control and Calibrate ADC Offset, *MathWorks* Inc., https://la.mathworks.com/help/mcb/gs/run-three-phase-AC-motors-open-loop-control-calibrate-adc-offset.html

Saady, I., Karim, M., Bossoufi, B., Motahhir, S., Adouairi, M. S., Majout, B., Lamnadi, M., Masud, M., y Al-Amri, J. F. (2021). Optimization for a Photovoltaic Pumping System Using Indirect Field Oriented Control of Induction Motor. *Electronics*, 10(24), 3076. https://doi.org/10.3390/electronics10243076

Santhosh, K., Prathyusha, M., TejaSri, K. S., y Preethi, K. (2018). Vector Control of Single-Phase Induction Motor Using MATLAB/Simulink. *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, 6(1). https://www.ijrar.org/papers/IJRAR19J1642.pdf

Stonier, A. A., Murugesan, S., Samikannu, R., Krishnamoorthy, V., Subburaj, S. K., Chinnaraj, G., y Mani, G. (2021). Fuzzy Logic Control for Solar PV Fed Modular Multilevel Inverter Towards Marine Water Pumping Applications. *IEEE Access*, 9, 88524–88534. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3090254

Vidaña, K. G., Lara, J., Hernández, C., y Arjona, M. A. (2022). Diseño y Evaluación de un Controlador de Lógica Difusa para la Extracción de la Máxima Potencia en un Sistema Fotovoltaico de 10KW Interconectado a la Red. *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo (CID) Tec Lerdo*, 8(1), 33–40. http://repocid.itslerdo.edu.mx/coninci2022/CID-060.pdf

Vidaña, K. G., Lara, J., Hernández, C., y Arjona, M. A. (2023). Control no lineal basado en lógica difusa de un convertidor multinivel de capacitor flotante para aplicaciones de energía solar fotovoltaica, *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo (CID) Tec Lerdo*, 9(1), 128–135. http://repocid.itslerdo.edu.mx/coninci2023/CID-065.pdf

Yussif, N., Sabry, O. H., Abdel-Khalik, A. S., Ahmed, S., y Mohamed, A. M. (2021). Enhanced Quadratic V/f-Based Induction Motor Control of Solar Water Pumping System. *Energies*, 14(1), 1–20. https://doi.org/10.3390/en14010104

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/