

Análisis Dinámico de Sistemas de Bombeo Solar Directo con Simulink

Dynamic Analysis of Direct Solar Pumping Systems with Simulink

Corona-Santos Héctor Eduardo¹, Rizo-Mendoza Raúl¹, Villalvazo-Laureano Efraín¹, Sandoval-Pérez Sergio², González-López Juan Miguel^{1*}

1 Universidad de Colima, Colima 28860, Mexico

2 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, Ciudad Guzman 49100, Mexico pcción, dirección de adscripción, Ciudad, Estado, País, CP.

Autor para la correspondencia: Juan Miguel González López. jgonzalez71@ucol.mx

Resumen

El uso de las energías alternativas ha tenido un auge en los últimos años en la agricultura. Con el avance de la electrónica de potencia, los controladores de carga han logrado quitar la dependencia del uso de baterías en sistemas de bombeo solar, obteniendo la energía necesaria para alimentar la bomba de agua directamente de los paneles solares, por lo que recientemente se han hecho estudios sobre este tipo de sistemas. En este artículo se describe el modelado dinámico de un sistema de bombeo solar directo con SIMULINK utilizando las herramientas ya incorporadas para modelar el panel solar, el controlador de carga y una bomba de agua 5Hp.

Palabras clave: Fotovoltaica, bombeo solar directo, Simulink.

Abstract

The use of alternative energies has increased in recent years in agriculture. With the advancement of power electronics, charge controllers eliminate the dependence on the use of batteries in solar pumping systems, obtaining the energy necessary to power the water pump directly from solar panels, which have recently been studied on these types of systems. This article describes the dynamic modeling of a direct solar pumping system with SIMULINK to model the solar panel, the charge controller, and a 5Hp water pump.

Key words: Photovoltaic, direct solar pumping, Simulink.

DOI : 10.46588/invurnus.v18i1.74

Recibido 11/11/2022

Aceptado 10/12/2022

Publicado 10/04/2023

Introducción

La escasez de agua es una problemática que ha ido en aumento con el paso de los años, afectando mayormente a las zonas agrícolas y en el abastecimiento de agua en zonas rurales aisladas. Al mismo tiempo que la creciente demanda alimenticia exige una mayor producción en un menor tiempo. Por lo que se han implementado sistemas de riego que permiten un uso más eficiente del agua (Andrade, 2017). Para esto se han desarrollado diversos sistemas con variadas tecnologías para garantizar su obtención y distribución. Los sistemas de bombeo solar directo han demostrado que pueden ser competitivos en relación con los sistemas de bombeo acopladas a motores diésel (Sontake, 2016.).

Un sistema de bombeo solar directo consta de paneles solares (Ver Figura 1), un variador de velocidad que para aplicaciones de mediana escala tienen integrado un inversor de voltaje, y las bombas de agua, generalmente sumergibles. Con el variador de velocidad se evita el uso de baterías por lo que el sistema se hace más eficiente y más económico, siendo viable para muchas aplicaciones en la agricultura.

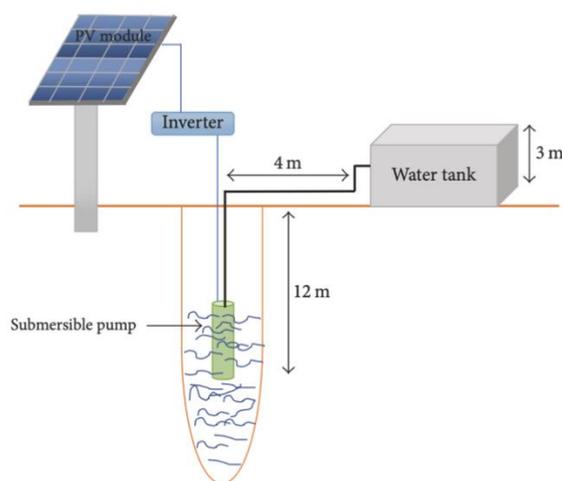


Figura 1. Esquema típico de un sistema de bombeo solar directo (Shatadru & M. Tariq, 2018).

Un análisis de un sistema de bombeo solar con diferentes configuraciones de un sistema de bombeo solar priorizando el tipo de arreglo del fotovoltaico con el objetivo de encontrar la configuración que dé como resultado un mejor rendimiento total del sistema de bombeo usando una bomba helicoidal se realizó en (Arunendra & Vilas, 2016). Mientras que (Kamlesh, y otros, 2015) plasman un estudio de eficiencia de los controladores para la bomba basados en SPCM por sus siglas en inglés (Sine Wave Pump Controller with MPPT) y variadores de frecuencia VFD con una comparación a diferentes alturas de bombeo obteniendo una eficiencia de 94% para el SPCM y 99% para el MPPT, en comparación con los VFD (Benghanem, Daffallah, Alamri, & Joraid, 2014) estudió el efecto de la altura, analizando cuatro alturas distintas: 50 m, 60 m, 70 m y 80 m; en esta última siendo la posición más óptima, también se notó que al aumentar el tamaño de la matriz fotovoltaica generalmente aumenta el caudal y la eficiencia del sistema.

El rendimiento de la bomba se estudió en (A. Djoudi, A.Hadj, & Salhi, 2017), el cual estaba alimentada con energía fotovoltaica partiendo de una adquisición de datos experimentales de dos bombas centrifugas modelándolas con motores de corriente directa sin acoplamiento de baterías; sin embargo, no muestra detalles de su modelado y comportamiento dinámico. El modelado dinámico se presenta en (Shatadru & M.



Tariq, 2018), el sistema de bombeo de agua solar presenta almacenamiento de energía para observar la variación del voltaje y la velocidad de la bomba después de una caída en la radiación solar y temperatura con el uso del software HOMMER, MATLAB Y SIMULINK tanto para sistemas con y sin baterías, solo que no muestra a gran detalle su modelado.

Por otro lado, (Dhiaa, Tamer, & Farrukh, 2017) analizan el estado del arte relacionados con sistemas de bombeo solar centrándose en investigaciones hechas que analizan el modelado, evaluación del rendimiento, el tamaño óptimo y el control de los PVPS. Esta revisión de más de 100 artículos publicados entre los años 1995-2015. (A. Al-Badi, y otros, 2017) realizaron un diseño y modelado de un sistema de bombeo de agua fotovoltaico con el objetivo de implementarlo en una granja ubicada cerca de la ciudad de Sohar (a 200 km de la ciudad de Muscat capital del país Omán. El sistema consta de módulos fotovoltaicos, inversor, motor de CA, pozo y tanque. Se calculó el tamaño de los paneles fotovoltaicos necesarios para hacer funcionar la bomba de agua, que depende de la cantidad de carga hidráulica. El estudio mediante un método numérico sobre el dimensionamiento y diseño óptimo de una unidad de estación de bombeo para una planta híbrida eólica-hidráulica se realizó en (John & Dimitris, 2007).

En este artículo se realiza un análisis dinámico detallado de un sistema de bombeo solar directo de 5hp. El sistema modelado considera un controlador con voltaje máximo de operación de 440Voc (Voltaje de circuito abierto en corriente continua) y una corriente máxima de 18A, una bomba de agua de 5Hp trifásica. El objetivo de esta investigación es la de conocer ampliamente el funcionamiento de este tipo de sistemas, ya que en la actualidad están teniendo un auge a la alza en la agricultura, el conocimiento de pleno de este tipo de sistemas puede ayudar a extender su aplicación como por ejemplo incorporar sistemas de fertilizado en el mismo bombeo, su utilización en esteros para la crianza de peces, camarón o incluso analizar su aplicación a gran escala en sistemas eléctricos de potencia como almacenamiento de energía en represas utilizando el rebombeo de agua, razón por la cual da origen el estudio de este tipo de sistemas.

Materiales y métodos

Metodología: Sistema de bombeo solar directo

La Figura 2 muestra un sistema de bombeo solar directo consta de paneles solares, un controlador de carga y una bomba. La energía empleada para el bombeo procede de los paneles fotovoltaicos, independientemente de si el agua se vierte a una balsa o se conduce directamente a riego. En cuanto la radiación solar comience a incidir sobre los paneles, la bomba de agua se pondrá en marcha y comenzará a mover al caudal de agua hacia el lugar deseado. Debido a que depende completamente del sol, el caudal variará según la energía producida por las placas solares, alcanzando su máximo rendimiento a mediodía.

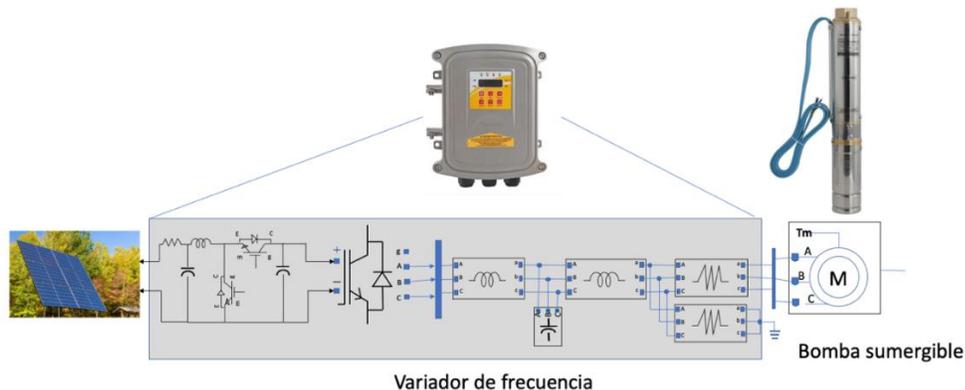


Figura 2. El sistema de bombeo solar con bombeo sin baterías (fuente: elaboración propia)

Modelado de paneles solares

Las celdas están diseñadas por una unión semiconductora PN. La celda fotovoltaica puede ser representada como se muestra en la Figura 3.

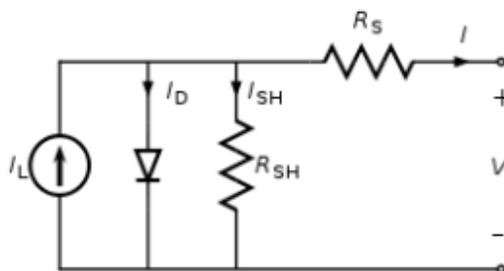


Figura 3. Circuito equivalente de una celda fotovoltaica (A. Al-Badi, y otros, 2017)

La corriente I es igual a la corriente generada, con pequeñas pérdidas de la corriente del diodo I_D y la corriente de derivación I_{sh} . La resistencia interna R_s representa la resistencia interna al flujo de corriente y depende del dopado de la unión PN, impurezas y resistencias de contacto.

En una celda ideal $R_s = 0$ (sin resistencia interna) y $R_{sh} = \infty$ (sin pérdidas a Tierra). En celdas típicas de 6.45 cm^2 R_s va de 0.05 a 0.1 Ω y R_{sh} de 200 a 300 Ω . En el circuito equivalente, la corriente en la carga I es igual a la corriente I_L generada por la iluminación, menos la corriente del diodo I_D y las pérdidas I_{sh} . Las ecuaciones para modelar la celda se resumen en la Tabla 1 (MatWorks, 2022)

Tabla 1 Ecuaciones para modelar el panel solar, (MatWorks, 2022)

Formula	Descripción
$I_{PH} = \frac{G}{G_{STC}} [\text{Área} \cdot J_{SC} + \alpha J_{SC} (T - T_{STC})]$	I_{PH} es la corriente foto-generada.
$I_D = I_o \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$	I_D es la corriente del diodo.
$I_o = \frac{J_{SC} \cdot \text{Área} \cdot T_k^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{V_T}}}{\left(\frac{V_{oc}}{e n V_T} - 1 \right) \cdot 300^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{V_T}}}$	Voltaje derivado referido al rotor del marco de referencia q
$V_D = I R_s + V$	Voltaje del diodo
$V_T = \frac{K T_K}{q}$	Voltaje térmico
$V_T' = \frac{K T_K}{q}; T_K = 300$	Voltaje térmico a temperatura estándar
$T_K = T * 273$	Temperatura en Kelvin



Para el modelo de paneles solares en SIMULIK, y el arreglo serie-paralelo de estos, se usa un bloque de Simscape donde se presenta como PV Array, de esta forma se puede simular un arreglo completo de paneles solares mixto, tal como se ilustra en la Figura 4.

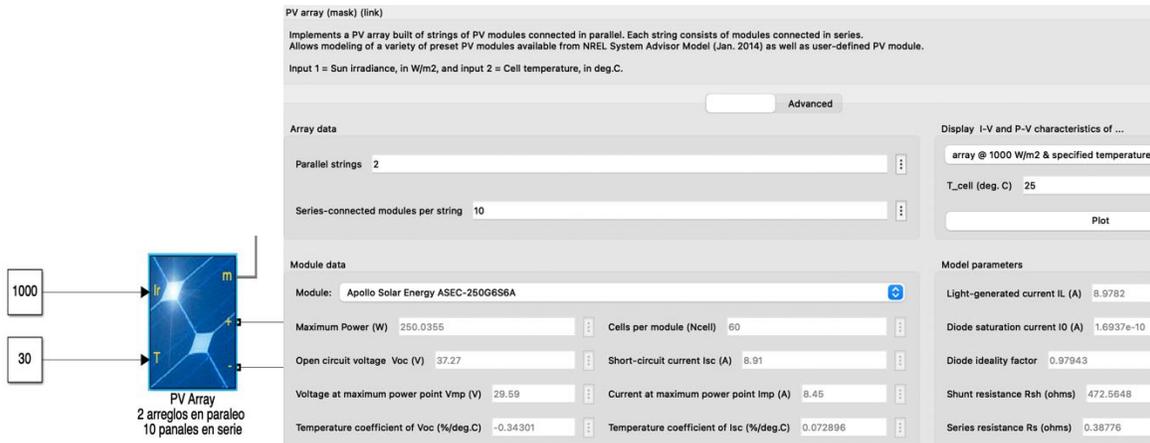


Figura 4. Arreglo serie-paralelo de paneles solares en simscape-SIMULINK (fuente: elaboración propia)

Observe que el arreglo modelado es de 20 paneles solares de 250W para abastecer a la bomba solar de 5Hp. Diez paneles solares conectados en serie proporcionan un voltaje de entrada al controlador de 372 Voc y una corriente máxima de 8.91A por string, cumpliendo con las restricciones importantes en el controlador de carga modelado.

Modelado del controlador solar

El controlador de carga tiene integrado un convertidor cc-cc y un inversor cd-ac, ver Figura 5. El convertidor cd-cd recibe la energía generada por el arreglo de paneles solares y se utiliza para reducir el nivel de voltaje de 370Vcc de los paneles a 220Vac para hacer funcionar a la bomba. Un inversor universal se conecta al convertidor cc-cc para convertir la componente de cd a ca.

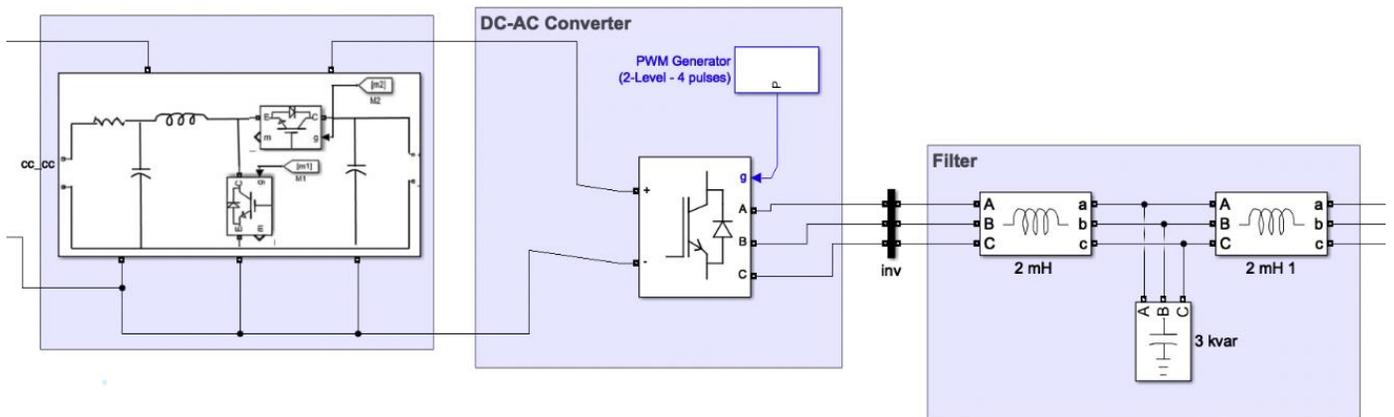


Figura 5. Modelado de controlador solar en SIMULINK (fuente: elaboración propia).



Modelado del convertidor cc-cc

El convertidor trabaja con los interruptores Q1 y Q2 complementados; cuando Q1 permanece abierto Q2 permanece cerrado y viceversa, Figura 6. Cuando S1 se encuentra cerrado o es igual a 1, la corriente circula de los paneles hacia la bobina L, la cual almacena energía en el campo magnético que se crea al pasar la corriente por ella.

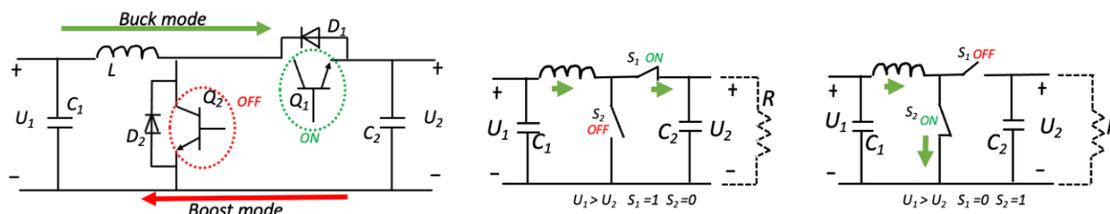


Figura 6. Funcionamiento del convertidor cc-cc (García, y otros, 2021).

Analizando sus circuitos se puede deducir su sistema de ecuaciones en representación de espacios de estado (García, y otros, 2021). Sin embargo, en Matlab-Simulink este convertidor se puede modelar como se ilustra en la Figura 7.

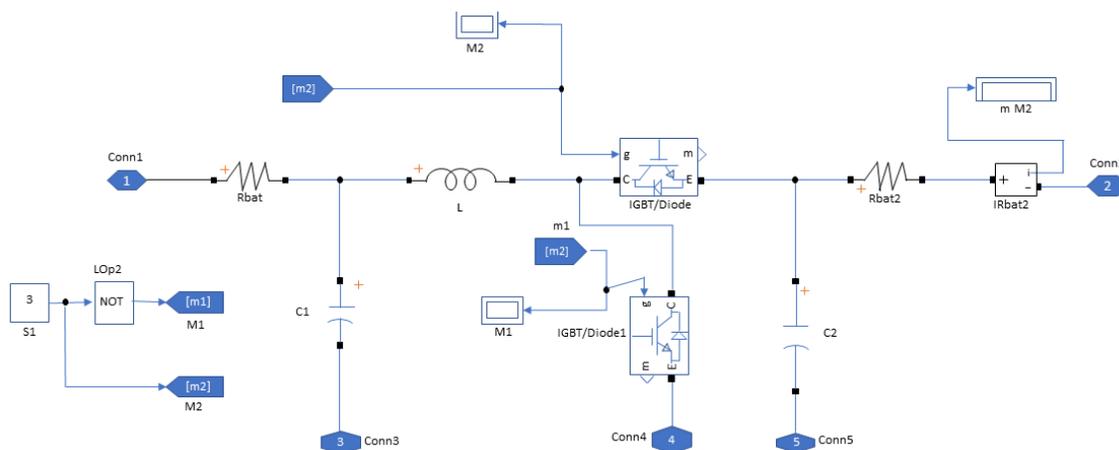


Figura 7. Convertidor cc-cc en SIMULINK(fuente: elaboración propia)

Dada la naturaleza del modelo de SIMULINK, los parámetros del convertidor estarán compuestos por los valores presentados en la Tabla II.

Tabla 2. Valores típicos de convertidor cc-cc

Características internas del convertidor cc-cc			
Diodo IGTB:	Ron=	1 mOhm	Resistencia interna (Ron)
	Rs=	0.005 mega Ohms	resistencia del amortiguador (Rs)
Inductancia	L=	1 mH	Inductancia(L):



Resistencia	$R= 9 \mu\text{Ohms}$	Resistencia (R)
Capacitores	$C= 1000\mu\text{F}$	Capacitancia(C)

Modelado del Inversor

En cuanto a los detalles de este convertidor DC/AC, el convertidor tiene la capacidad de transferir de forma rápida y eficiente una cantidad dada de potencia activa y reactiva. Debe ser capaz de transferir toda la potencia que le envía el convertidor cc-cc para transmitirla a la carga en este caso la bomba debe hacer todo ello de forma rápida y de forma eficiente.

El inversor está compuesto por un bus DC y un puente H de dos ramas. Cada rama contiene dos interruptores que conmutan de acuerdo a la estrategia de control, para este artículo se considera un control PWM variante con la radiación solar. Cada interruptor del puente H está compuesto por un IGBT (Q1, Q2, Q3 y Q4) y un diodo en antiparalelo (D1, D2, D3 y D4). El disparo de los interruptores se realiza mediante señales digitales en las puertas G1, G2, G3, y G4. El inversor convierte la tensión DC del bus de continua en corriente alterna AC inyectando corriente al motor de la bomba. El elemento usado de las librerías de simscape SIMULINK es “Universal Bridge” el cual es un bloque de implementa un puente de dispositivos electrónicos de potencia seleccionados, para realizar la conversión de DC/AC. Las señales de control implementadas son a través de un generador de ancho de pulsos a 2kHz y un ciclo de trabajo de 0.8.

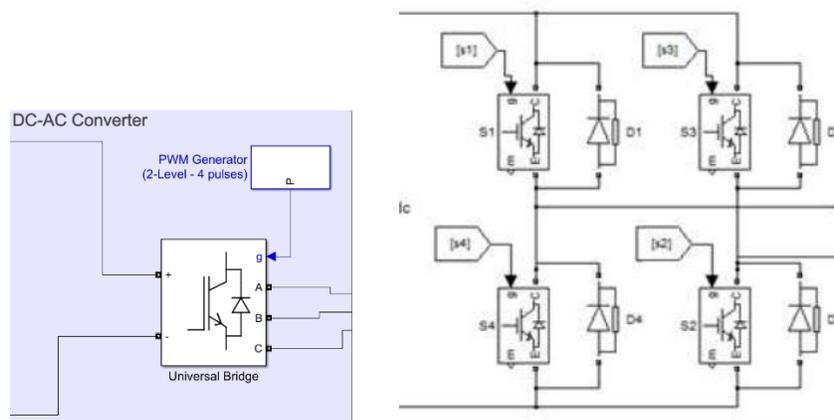


Figura 8. Esquema de puente universal en SIMULINK (fuente: elaboración propia).

Filtro

El filtro es un conjunto de elementos inductivos, resistivos y capacitivos para filtrar la señal generada y evitar armónicos, mantener una energía óptima, así como un filtro para asegurar del voltaje y corriente con el cual se alimentará a la carga que en este caso es la bomba. La configuración serie paralelo se observa en la Figura 9. Las cargas inductivas están en serie, mientras que el elemento capacitivo se encuentra en paralelo. Los valores de las bobinas y del capacitor se consideran los reportados por (Shatadru & M. Tariq, 2018)

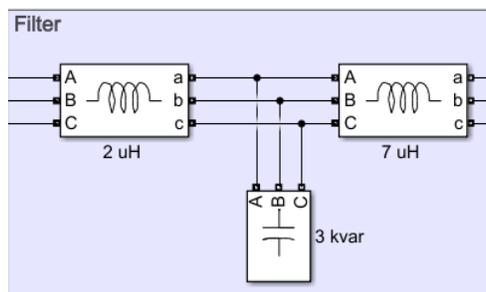


Figura 9. Modelado del filtro de voltaje (fuente: elaboración propia)

Modelado de la bomba

La forma de representar la bomba solar y poder analizar su comportamiento es mediante el modelo de una máquina asíncrona trifásica, por lo que esta puede tener diferentes tipos de rotores como lo son: wound rotor, jaula de ardilla, devanados en serie, se opta por un motor clásico de jaula de ardilla cuyo modelo se encuentra en (Krause P. C., Wasynczuk, Sudhoff, & Pekarek, 2013) donde el estator y rotor se representan mediante la Figura 10 y su sistema de ecuaciones representadas en la Tabla 2.

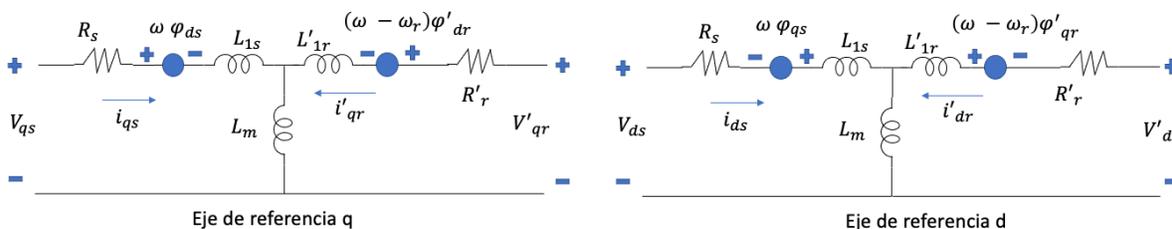


Figura 10. Circuito equivalente de una maquina asíncrona en el eje q y d, referida al rotor (Krause P. C., Wasynczuk, Sudhoff, & Pekarek, 2013).

En la Tabla 2 se muestran las ecuaciones completas para modelar al motor y sus parámetros se pueden encontrar en (Mathworks-Asynchronous-Machine, 2022).

Tabla 3. Ecuaciones de la bomba sumergible, (Mathworks-Asynchronous-Machine, 2022).

Ecuación	Descripción
$V_{qs} = R_s i_{qs} + d\varphi_{qs} i_{dt} + \omega \varphi_{ds}$	Voltaje del estator del marco de referencia q
$V_{ds} = R_s i_{ds} + d\varphi_{ds} i_{dt} - \omega \varphi_{qs}$	Voltaje del estator del marco de referencia d.
$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + d\varphi'_{qr} i_{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}$	Voltaje derivado referido al rotor del marco de referencia q
$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + d\varphi'_{dr} i_{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}$	Voltaje derivado referido al rotor del marco de referencia d
$T_e = 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$	Torque electromagnético.
$\varphi_{qs} = (L_s i_{qs} - L_m i'_{qr})$	Flujo magnético del estator del marco de referencia q
$\varphi_{ds} = (L_s i_{ds} - L_m i'_{dr})$	Flujo magnético del estator del marco de referencia d
$\varphi'_{qr} = (L'_r i'_{qs} + L_m i_{qs})$	Flujo magnético del rotor del marco de referencia q



$\varphi'_{dr} = (L'_s i'_{qr} + L_m i_{qr})$	Flujo magnético del rotor del marco de referencia q
$L_s = (L_{1s} + L_m)$	Inductancia total del estator.
$L'_r = (L'_{1r} + L_m)$	Inductancia del rotor.
$\frac{d}{dt}(\omega_m) = \frac{1}{2H}(T_E - F_{\omega m} - T_m)$	Velocidad del rotor.
$\frac{d}{dt}(\theta_m) = (\omega_m)$	Posición angular del rotor.

Resultados y Discusión

Resultados del modelado del sistema de bombeo solar directo

La Figura 11 ilustra el modelado completo del sistema de bombeo solar directo incluyendo los arreglos de paneles solares, el convertidor cc-cc, inversor, filtro y la bomba. Para el análisis dinámico se considera una radiación solar de $1000W/m^2$ trabajando a una temperatura de operación de $30^\circ C$.

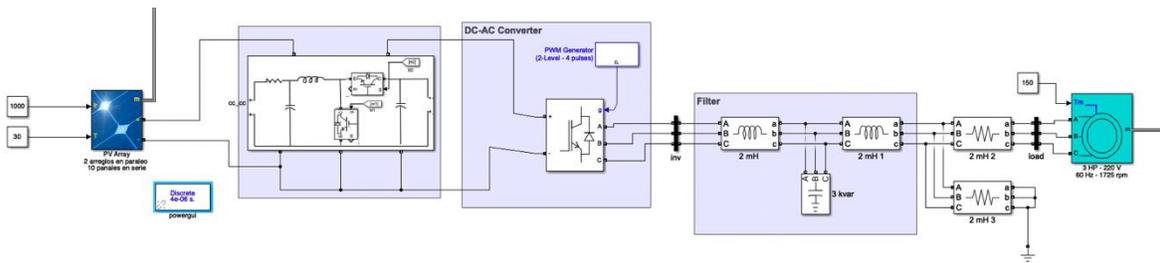


Figura 11. Modelado del sistema de bombeo solar de 5HP (fuente: elaboración propia).

La Figura 12 por su parte muestra el comportamiento del voltaje entregados por el arreglo fotovoltaico y el voltaje a la entrada del inversor. El inversor entrega un voltaje y una corriente trifásica a la bomba, por otro lado la Figura 13 muestra el voltaje de fase-fase y la corriente en la fase A.

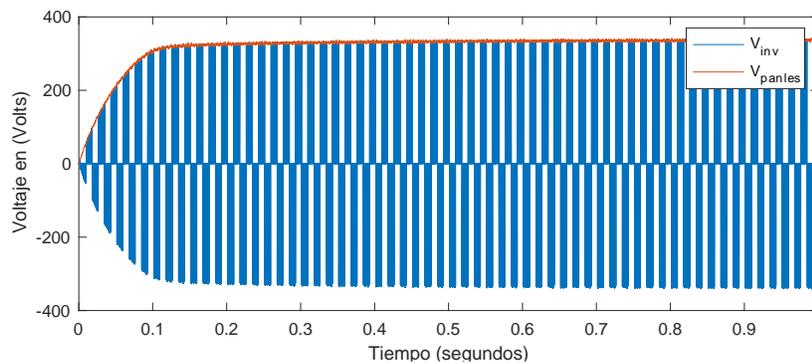


Figura 12. Voltaje del arreglo fotovoltaico y voltaje en inversor (fuente: elaboración propia).



Los valores obtenidos son los esperados de acuerdo a las hojas de datos de una bomba característica de este tipo para 5HP ya que se espera un voltaje a 220V ac y un consumo de corriente de 15A ac, tal como lo especifica su manual de fabricante (Evans, 2022).

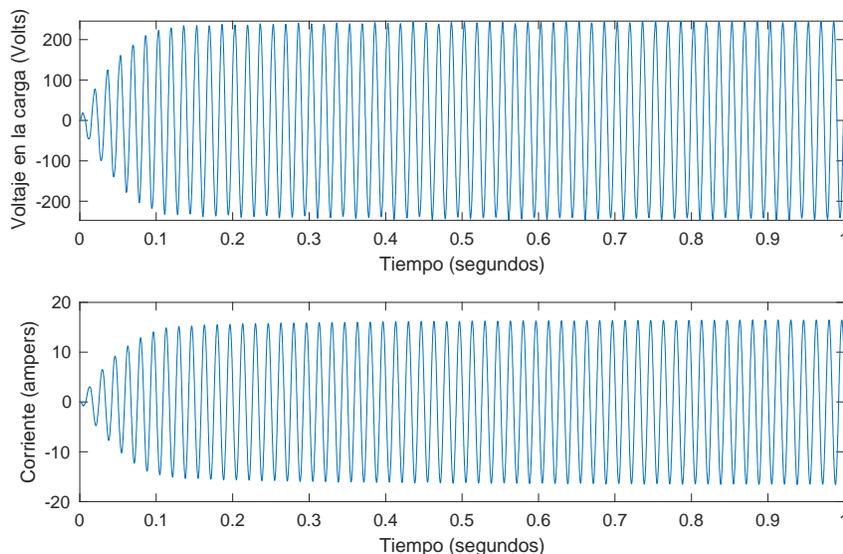


Figura 13. Voltaje entre fases y corriente en fase a (fuente: elaboración propia).

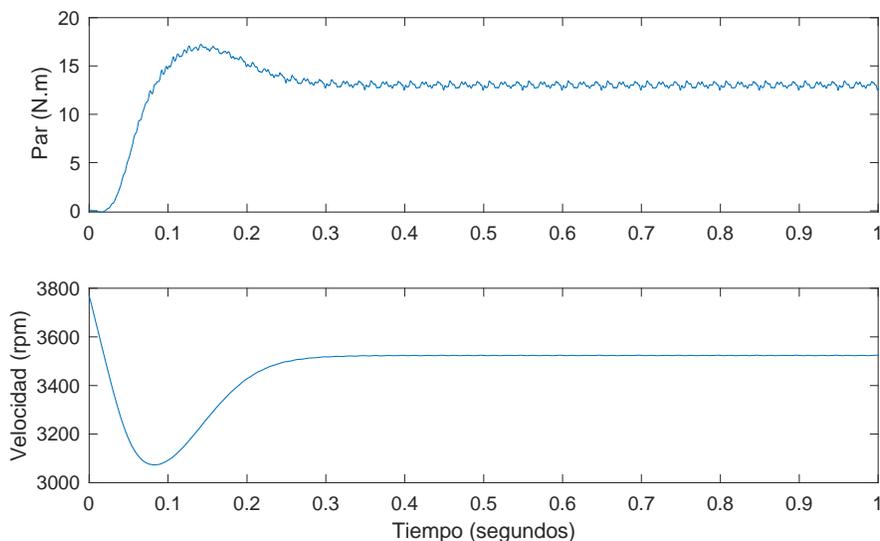


Figura 14. Par y velocidad de la bomba (fuente: elaboración propia).

La Figura 14 muestra el comportamiento del par y la velocidad de la bomba, el valor del par seleccionado es en base a las condiciones nominales de la bomba, mientras que la velocidad alcanzada por



la bomba es de 3520 rpm contra las 3450 reportadas por el manual de usuario de la bomba, esta diferencia se debe a las condiciones iniciales del modelado y al par seleccionado.

Trabajos futuros

Es importante considerar todos los aspectos en los cuales trabaja una bomba de agua solar directa, como lo es la parte eléctrica e hidráulica. Para realizar un análisis adecuado se deben considerar para la parte eléctrica, el modelado tal y como se presenta en este artículo y aunque los resultados presentados son congruentes con los reportados en la literatura es evidente la falta de mediciones de equipo real. Por otro lado, la dinámica de extracción del agua juega un papel importante en el consumo de energía bajo diferentes valores de radiación solar y altura de extracción de agua, por lo que se tienen considerado trabajar en estos dos aspectos.

Conclusiones

En este artículo se presenta un gran detalle del modelado de una bomba solar directa que no depende del uso de baterías. El modelado presentado fue hecho en Matlab-Simulink, donde se presenta la simulación de un arreglo fotovoltaico de 20 paneles solares, con conexiones de diez paneles en serie de 250 Watts y estas series conectadas en paralelo. El arreglo fotovoltaico es conectado a un convertidor de cc-cc y a un inversor modelando de esta forma el controlador de carga considerando un filtro de armónicos para filtrar la señal de voltaje obtenida del convertidor y conectándola a la bomba de agua. La bomba de agua fue modelada mediante un motor trifásico asíncrono; el sistema considerado es de HP.

Referencias

1. A. Al-Badi, H. Yousef, T. Al Mahmoudi, M. Al-Shammaki, A. Al-Abri, & Y A. Al-Hinai. (2017). Sizing and modelling of photovoltaic water pumping system. *International Journal of Sustainable Energy*, 415-427.
2. Sontake, V. C. (2016.). Solar photovoltaic water pumping system-A comprehensive review. . *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 1038-1067.
3. Krause, P. C., Wasynczuk, O., & D.Sudhoff, S. (2002). *ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY AND DRIVE SYSTEMS, Second Edition*. New York: Wiley-IEEE Press .
4. Andrade, F. H. (2017). *Los desafíos de la agricultura argentina: satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental*. Argentina: INTA.
5. Arunendra, K., & Vilas, R. (2016). Performance investigations of solar water pumping system using helical pump under the outdoor condition of Nagpur, India. *ELSEVIER*, 737-745.
6. Kamlesh, Y., O.S.Sastry, R.Wandhare, N.Sheth, M.Kumar, B.Bora, . . . A.Kumara. (2015). Performance comparison of controllers for solar PV water pumping applications. *ELSEVIER*, 195-202.
7. Benghanem, M., Daffallah, K., Alamri, S., & Joraid, A. (2014). Effect of pumping head on solar water pumping system. *ELSEVIER*, 334-339.
8. A. Djoudi, G., A.Hadj, A., & Salhi, H. (2017). Improvement and validation of PV motor-pump model for PV pumping system performance analysis. *ELSEVIER*, 310-320.
9. Shatadru, B., & M. Tariq, I. (2018). Dynamic Modelling of a Solar Water Pumping System with Energy Storage. *Hindawi, Journal of Solar Energy*, 1-12.



10. Dhiaa, H. M., Tamer, K., & Farrukh, N. (2017). A review of photovoltaic water pumping system designing methods, control strategies and field performance. *ELSEVIER*, 70-86.
11. John, S., & Dimitris, E. (2007). Pumping station design for a pumped-storage wind-hydro power plant. *ELSEVIER*, 3009-3017.
12. García, M. F., González-López, J. M., Betancourt, R. O., González, M. A., Laureano, E. V., & Haro, F. R. (2021). Análisis de convertidores bidireccionales cc-cc en representación de ecuaciones en espacios de estado. *Difu100ci@, Revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías.*, 155-161.
13. Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. D. (2013). *Analysis of electric machinery and drive systems*. John Wiley & Sons.
14. MatWorks. (05 de 09 de 2022). *Solar PV characteristics using m-code*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/61388-solar-pv-characteristics-using-m-code>
15. Mathworks-Asynchronous-Machine. (23 de 08 de 2022). Obtenido de https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html?s_tid=src_htitle_asynchronous%20machine_1
16. Evans. (05 de 09 de 2022). *BOMBAS SUMERGIBLES*. Obtenido de https://tiendaevans.com.mx/assets/pdf/productos/prdct_61bbea71ca6ee.pdf

