

# MODELADO, SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO (FOTOVOLTAICO-BATERÍA) AUTÓNOMO PARA SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA VIVIENDA CON ESTACIÓN DE BOMBEO DE AGUA PARA USO DOMÉSTICO Y AGRÍCOLA: PARTE 1

*Serafin F. Sosa Barrera<sup>a</sup>, Oswaldo M. Morales Taquiri<sup>b</sup>*

*a Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería. Av Alfredo Benavides N° 5440, Santiago de Surco-Lima-Perú*

*b Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Av Túpac Amaru N° 210, Rímac-Lima-Perú.*

## Resumen

En áreas rurales el suministro de agua para uso agrícola y potable para la población es escasa. Una posibilidad de solución a este problema es el uso de un sistema de bombeo solar fotovoltaico (FV) para cuyo diseño normalmente se toman en cuenta las condiciones más adversas, como la relación no lineal entre el caudal de agua y la energía solar, la demanda máxima de agua y el nivel mínimo de irradiación solar. Este criterio de diseño origina un sobredimensionamiento del sistema FV. Para remediar este problema se propone utilizar un sistema híbrido (FV-Batería) autónomo para suministrar energía eléctrica a una vivienda con estación de bombeo de agua para uso doméstico y agrícola, en el cual se pueda ejercer un control que interactúe entre la demanda y el suministro de agua a bombear. Este trabajo propone en la Parte 1 el estudio, usando simulaciones en el entorno Matlab/Simulink, de las características de funcionamiento del sistema híbrido (FV-Batería) autónomo y de la estación de bombeo de agua para uso doméstico y agrícola, para tener una visión general del rendimiento del sistema y cada uno de sus componentes, tomando en cuenta los parámetros climáticos de la zona de estudio, y el efecto de la altura manométrica total sobre el caudal de bombeo. Esta simulación será validada, en la Parte 2, con un muestreo experimental. Este estudio proyecta presentar un modelo simple que nos permita contribuir en los estudios de dimensionamiento de sistemas de bombeo de agua con energía FV.

**Palabras Clave:** Sistema GFV; Convertidor de Potencia DC/DC; MPPT; Eficiencia del sistema de bombeo FV.

## Abstract

In rural areas, the supply of water for agricultural and drinking purposes for the population is scarce. One possible solution to this problem is the use of a photovoltaic (PV) solar pumping system, whose design usually takes into account the most adverse conditions, such as the non-linear relationship between water flow and solar energy, demand maximum water and the minimum level of solar irradiation. This design

criterion causes an oversizing of the PV system. To remedy this problem, it is proposed to use a stand-alone hybrid (PV-Battery) system to supply electricity to a house with a water pumping station for domestic and agricultural use, in which control can be exercised to interact between demand and demand. supply of water to be pumped. This work proposes in Part 1 the study, using simulations in the Matlab / Simulink environment, of the operating characteristics of the hybrid system (PV-Battery) autonomous and of the water pumping station for domestic and agricultural use, to have a general view of the performance of the system and each of its components, taking into account the climatic parameters of the study area, and the effect of the total manometric height on the pumping flow. This simulation will be validated, in Part 2, with an experimental sampling. This study plans to present a simple model that allows us to contribute to the studies of sizing of water pumping systems with PV energy.

**Keywords:** PVG system; DC/DC Power Converter; MPPT; PV pumping system efficiency

## 1. Introducción

El sistema de bombeo de agua es una de las aplicaciones más utilizadas en la producción de energía renovable. Esta aplicación se usa en áreas aisladas donde no se cuenta con red eléctrica [1]. Las poblaciones a menudo usan el sistema FV para el funcionamiento de sus equipos eléctricos en el hogar y en una estación de bombeo para satisfacer sus necesidades de agua domésticas o para el riego [2], [3], por lo que este es uno de los factores que pueden desempeñar un papel importante para la estabilidad de la vida rural. El dimensionamiento adecuado del sistema FV para esta aplicación será de vital importancia para su aplicabilidad desde el punto de vista técnico económico. Como se muestra en [4], todos los sistemas fotovoltaicos, particularmente el de bombeo de agua con energía solar FV, se ven afectados de manera no lineal por la intensidad de la radiación solar, a través de un generador FV que genera cantidades de voltaje de corriente puramente no lineales (I-V). La no linealidad de las cantidades entregadas por el generador FV requiere la introducción de la técnica de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), por sus siglas en inglés, ya que sólo hay un punto en la curva característica I-V donde la potencia es máxima.

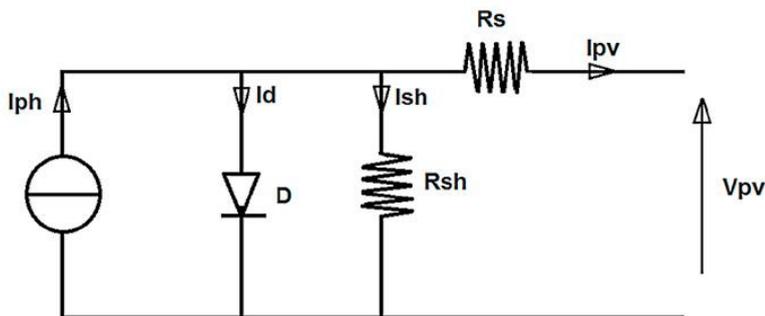
En general, los sistemas de bombeo fotovoltaico funcionan sin baterías de almacenamiento. El almacenamiento de agua en tanques es la solución más adoptada en la mayoría de las aplicaciones de bombeo. Sin embargo, en algunos casos, existen baterías de almacenamiento para algunas aplicaciones de bombeo FV para usos diurnos y durante días nublados. También se ha desarrollado un método general para la evaluación del rendimiento a largo plazo de un sistema de bombeo de agua alimentado por energía solar fotovoltaica con seguimiento de máxima potencia [5]. Varios investigadores [6-9] han desarrollado diferentes modelos para simular el rendimiento de una matriz fotovoltaica. También desarrollaron modelos para estudiar el rendimiento del inversor, motor, bomba y MPPT. Sin embargo, existe una relación no lineal complicada entre estos modelos, que requiere habilidades numéricas para tratar

con los modelos. Los modelos propuestos no proporcionan una relación directa entre la potencia eléctrica de funcionamiento del subsistema de bombeo y el caudal de agua de la bomba. Por lo cual es necesario desarrollar un método general para simular el rendimiento a largo plazo de los sistemas de bombeo de agua fotovoltaica en un sitio determinado. El principal obstáculo en la comercialización de cualquier tecnología solar es el costo por vatio del sistema instalado. Los agricultores con mayores ingresos pueden permitirse un nuevo sistema integrado, es decir, un panel fotovoltaico con un conjunto de bomba de motor DC. Los agricultores de bajos y medianos ingresos no pueden permitirse el alto costo del sistema integrado. Aquí se ha intentado absorber las bombas de agua de AC existentes de los agricultores. El objetivo principal del presente trabajo es desarrollar un método general para la evaluación del rendimiento a largo plazo de un sistema de bombeo de agua impulsado por energía fotovoltaica de acoplamiento directo y utilizando inversores para usar bombas en AC existentes, combinando datos experimentales con formulaciones matemáticas.

## 2. Modelado del generador fotovoltaico (GFV) y descripción del sistema de bombeo

### 2.1. Modelado del sistema de GFV

Un módulo fotovoltaico está compuesto por células fotovoltaicas, conectadas entre ellas en serie y/o en paralelo.



**Figura 1.** Modelo eléctrico de una célula FV.

A partir de este circuito, y aplicando la ley de Kirchhoff, derivaremos las siguientes ecuaciones:

Corriente del generador fotovoltaico:

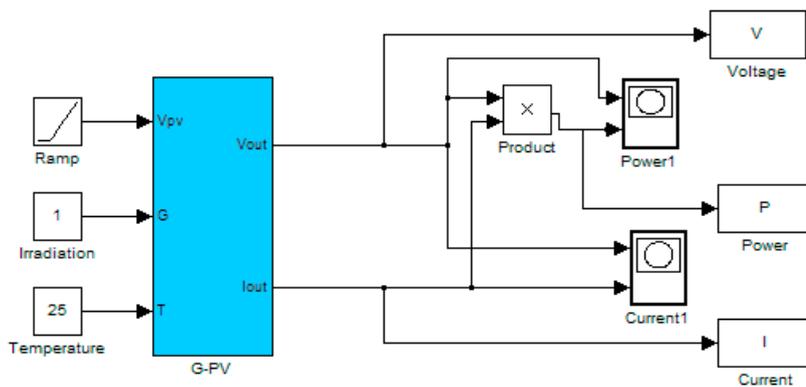
$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V_{PV} + R_s \cdot I_{PV})}{A \cdot K \cdot T \cdot N_s} \right) - 1 \right] - N_p \left( \frac{q \cdot (V_{PV} + R_s \cdot I_{PV})}{R_s \cdot R_{sh}} \right) \quad (1)$$

Voltaje del generador fotovoltaico:

$$V_{PV} = \frac{AKTN_S}{q} \left[ \ln \left( \frac{I_{ph} - \frac{I_{PV}}{N_P}}{I_{rs}} + 1 \right) - \frac{N_S}{N_P} \cdot R_S \cdot I_{PV} \right] \quad (2)$$

donde:  $N_P$  y  $N_S$ : son respectivamente el número de células conectadas en paralelo y en serie,  $I_{ph}$ : es la fotocorriente es proporcional al flujo de irradiación solar,  $I_{rs}$ : es la corriente de saturación del diodo,  $V_{pv}$  e  $I_{pv}$ : son respectivamente la tensión y la corriente de la celda,  $R_s$  y  $R_{sh}$ : son respectivamente la resistencia en serie y paralelo de la celda. ( $q = 1,02 \cdot 10^{-19}$  C) es la carga de electrones,  $A$ : es el factor de idealidad del diodo, ( $K = 1,3805 \cdot 10^{-38}$  J/K) es la constante de Boltzmann, y  $T$ : es la temperatura ambiente en °C.

De la configuración del GFV como se muestra en la figura 1 y las ecuaciones (1) y (2), se establece el modelo Simulink para el generador fotovoltaico, como se muestra en la figura 2.

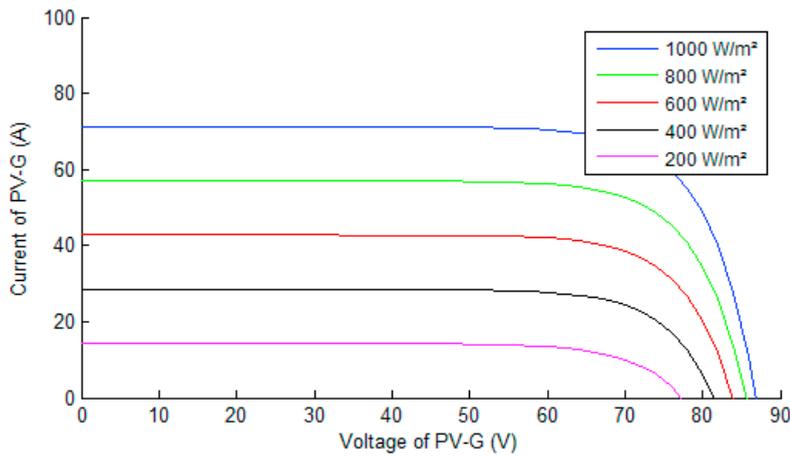


**Figura 2.** Modelo Simulink de generador fotovoltaico

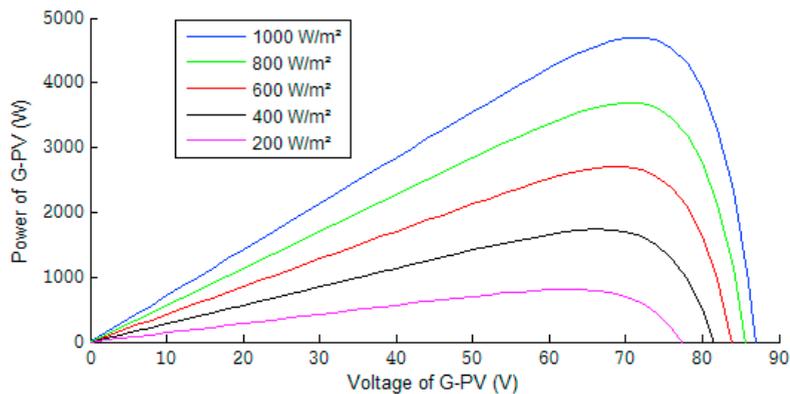
### 2.1.1. Efecto de la irradiación

La irradiación estándar internacionalmente aceptada para medir la respuesta de los paneles fotovoltaicos es una radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  y una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

Fijando la temperatura a  $25^\circ\text{C}$  y variando la irradiación de  $200 \text{ W/m}^2$  a  $1000 \text{ W/m}^2$ , con intervalos de  $200 \text{ W/m}^2$ , se obtienen las curvas características de Corriente-Voltaje (I-V) y de Potencia-Voltaje (P-V), que se muestran en las figuras 3 y 4.



**Figura 3.** Influencia de la irradiación en la curva característica I-V



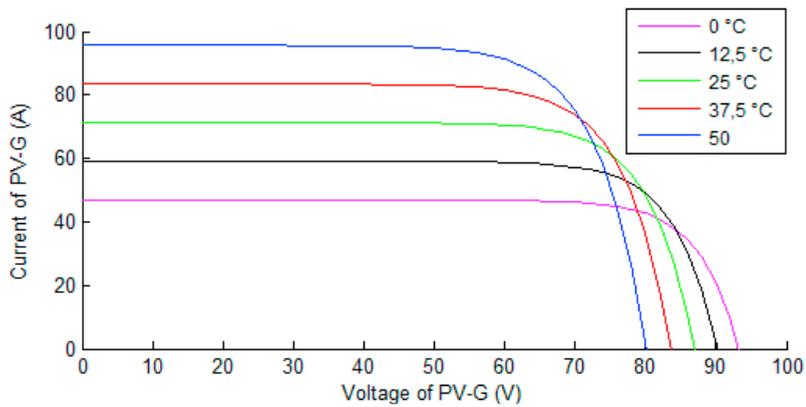
**Figura 4.** Influencia de la irradiación en la característica P (V)

De las figuras 3 y 4 se observa que:

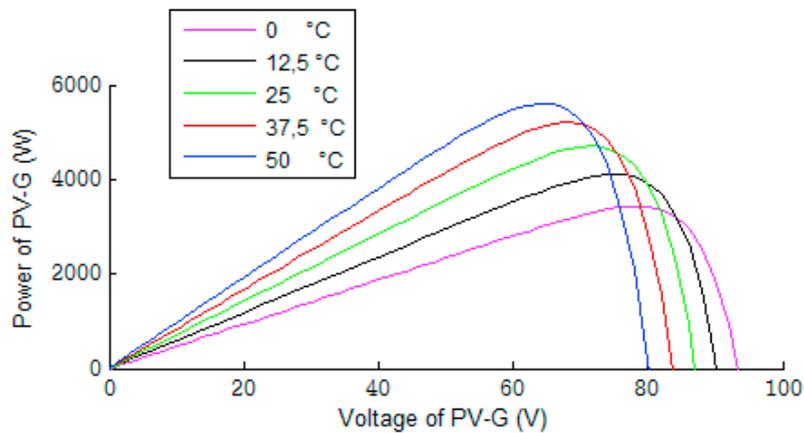
- El valor de la corriente de cortocircuito es directamente proporcional a la intensidad de la radiación. La tensión de circuito abierto no varía en las mismas proporciones, permanece casi idéntica incluso con poca iluminación.
- El generador fotovoltaico está muy influenciado por la variación de la irradiación, la potencia varía en proporción a la radiación y el punto de máxima potencia se mueve de acuerdo con la intensidad de la luz solar.

### 2.1.2. Efecto de la temperatura

Para observar la influencia de la temperatura en los módulos fotovoltaicos se fija la irradiación a  $1000\text{W/m}^2$  y se varía la temperatura entre  $0^\circ\text{C}$  y  $50^\circ\text{C}$ , obteniéndose las curvas características I-V y P-V, mostradas en las figuras 5 y 6.



**Figura 5.** Influencia de la temperatura sobre la curva característica I-V

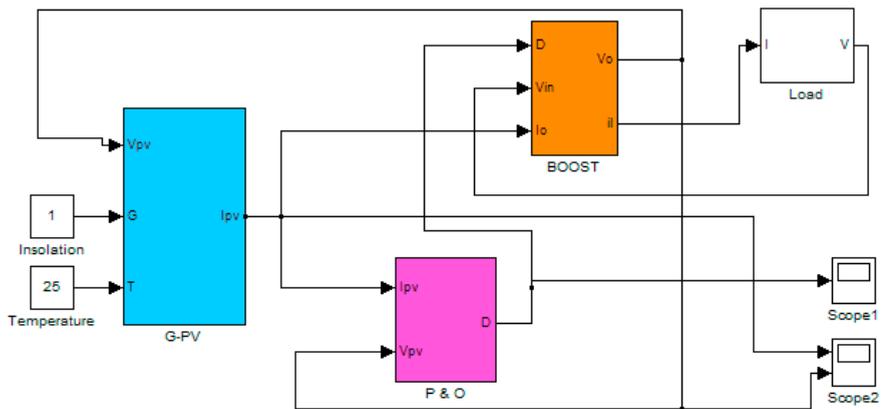


**Figura 6.** Influencia de la temperatura sobre la curva característica P-V.

De las figuras 5 y 6 se observa para una irradiación dada:

- El voltaje del circuito abierto disminuye con el aumento de la temperatura.
- La corriente de cortocircuito aumenta con la temperatura.
- La potencia del generador aumenta ligeramente con la disminución de la temperatura.

Esta variación se puede optimizar usando un seguidor del punto de potencia máxima, MPPT, por sus siglas en inglés. El modelo Simulink del sistema considerando el uso de un MPPT es el siguiente:

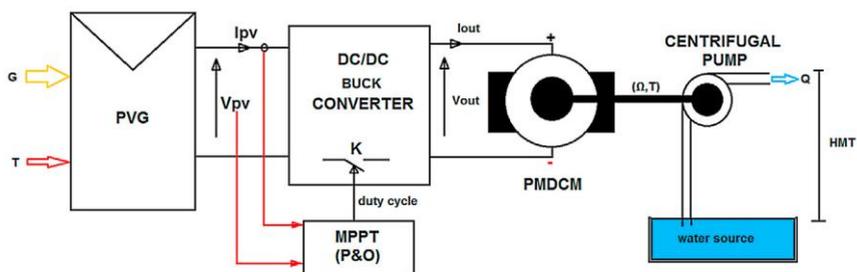


**Figura 7.** Modelo Simulink del sistema usando un MPPT.

Para justificar y ver la efectividad de la implementación de un sistema de adaptación MPPT entre el generador fotovoltaico y la carga, se procede primero a simular el sistema sin el control MPPT, y luego con este control.

## 2.2. Descripción del sistema del sistema de bombeo

El sistema a estudiar se muestra en la figura 8, para el sistema de bombeo FV se tiene tres partes; Un generador FV compuesto por módulos fotovoltaicos conectados en serie y paralelo, un convertidor de potencia de DC/DC y un motor de DC de imán permanente acoplado directamente a una bomba centrífuga [10-11].



**Figura 8.** Descripción del sistema de bombeo fotovoltaico.

## 3. Modelado del rendimiento del sistema

Para evaluar el rendimiento de todo el sistema, determinaremos el rendimiento de cada subsistema [12]:

- La eficiencia del GFV se calcula por la relación entre la potencia eléctrica entregada  $P_{FV}$  (W) y la cantidad de radiación solar  $E_s$  (W/m<sup>2</sup>) recibida en la superficie  $S$  (m<sup>2</sup>) de cada celda del GFV:

$$\eta_{FV} = \frac{P_{FV}}{E_s S N_s N_p} \quad (3)$$

- La eficiencia del convertidor de DC/DC es:

$$\eta_{Conv} = \frac{P_{Sal}}{P_{FV}} = \frac{P_{Sal} \cdot I_{Sal}}{V_{FV} \cdot I_{FV}} \quad (5)$$

- La eficiencia de la moto-bomba es:

$$\eta_{Bomba} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{neta}}{3600 \cdot P_{Sal}} \quad (6)$$

donde: ( $\rho = 1000$  Kg/m<sup>3</sup>) es la densidad del agua, ( $g = 9.8$  m/s<sup>2</sup>) es la constante gravitacional,  $H_{neta}$  es la altura neta,  $Q$  es la velocidad de flujo (m<sup>3</sup>/s) y  $P_{sal}$  es la potencia de salida del convertidor de potencia DC/DC.

Por lo tanto, se deduce la eficiencia general del sistema:

$$\eta_{sistema} = \eta_{FV} \cdot \eta_{Conv} \cdot \eta_{Bomba} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{neta}}{3600 \cdot E_s \cdot S \cdot N_s \cdot N_p} \quad (7)$$

#### 4. Resultados y discusiones

La cantidad del caudal de agua bombeada es proporcional al parámetro de irradiación solar, sensible a la altura neta de bombeo, y casi no depende del parámetro de cambio de temperatura ambiente.

El rendimiento de la motobomba es sensible a la altura neta ( $H_{neta}$ ) y a las variaciones de irradiancia solar. Debido a que este último genera una corriente importante que es proporcional al caudal de agua bombeada por medio del par del motor.

#### 5. Conclusión

Las curvas características I-V y P-V del GFV son dependientes de la irradiación y de la temperatura de la célula del módulo. Dentro de esta no linealidad se puede determinar el punto donde el GFV entrega la potencia máxima, la cual es sensible a las condiciones climáticas (irradiación solar, temperatura ambiente y temperatura de la célula del módulo). Para la optimización del sistema es necesario introducir un convertidor de DC/DC controlado por la técnica MPPT. Cuando la motobomba es energizada en forma directa, el caudal de agua bombeada es sensible a las variaciones de las condiciones climáticas, especialmente a la irradiación, por lo que este caudal es al mismo tiempo demasiado sensible a la  $H_{neta}$ . Para el uso de sistemas de bombeo convencionales se recomienda utilizar un sistema de almacenamiento de energía eléctrica en baterías y un inversor. Para evaluar el rendimiento del sistema de bombeo con GFV, se debe

determinar el rendimiento de cada subsistema que compone este sistema, en diferentes circunstancias (diferentes parámetros climáticos y físicos).

## **Bibliografía**

- [1] K. Meah, S. Fletcher, S. Ula, Solar photovoltaic water pumping for remote locations, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12(2) (2008) 472–487.
- [2] P. E. Campana, Y. Zhu, E. Brugiati, H. Li, and J. Yan, PV Water Pumping for Irrigation Equipped with a Novel Control System for Water Savings, *Energy Procedia.* 61 (2014) 949–952.
- [3] A. A. Ghoneim, Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems, *Energy Convers. Manag.* 47(11–12) (2006) 1449– 1463.
- [4] B. Yesilata and Z. A. Firatoglu, Effect of solar radiation correlations on system sizing: PV pumping case, *Renew. Energy.* 33(1) (2008) 155– 161.
- [5] Ghoneim A. Design optimization of photovoltaic powered water pumping Systems. *Energy Convers Manage* 2006;47(11):1449–63.
- [6] Al-Ibrahim AM. Optimal selection of direct-coupled photovoltaic pumping system in solar domestic hot water systems PhD thesis. Madison,USA: Mechanical Engineering, University of Wisconsin; 1996.
- [7] Klein SA. In: TRNSYS users manual, version 14.1. Madison, USA: Engineering Experimental Station, University of Wisconsin; 1994. p. 2424–35.
- [8] Badescu V. Time dependent model of a complex PV water pumping system. *Renewable Energy* 2003;28(4):543–60.
- [9] Hadj Arab A, Benghanem M, Chenlo F. Motor-pump system modelization. *Renewable Energy* 2006;31(7):905–13.
- [10] J. M. Enrique, E. Durán, M. Sidrach-de-Cardona, J. M. Andújar, Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies, *Sol. Energy.* 81(1) (2007) 31–38.
- [11] S. Kolsi, H. Samet, M. B. Amar, Design Analysis of DC-DC Converters Connected to a Photovoltaic Generator and Controlled by MPPT for Optimal Energy Transfer throughout a Clear Day, *J. Power Energy Eng.* 02(01) (2014) 27–34.

- [12] A. Mohammedi, N. Mezzai, D. Rekioua, T. Rekioua, Impact of shadow on the performances of a domestic photovoltaic pumping system incorporating an MPPT control: A case study in Bejaia, North Algeria, *Energy Convers. Manag.* 84 (2014) 20–29.