

DISEÑO BOX – BEHNKEN PARA OPTIMIZAR EL RENDIMIENTO DE UN PICO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

BOX - BEHNKEN DESIGN TO OPTIMIZE THE PERFORMANCE OF A PEAK PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEM

Armando Delzo-Salomé ^{1*} , Oscar Huari-Vila ¹ , Jorge Salazar-Mercado ¹ 

¹Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Mecánica, Huancayo, Perú.

Recibido (Received): 04 / 09 / 2020 Aceptado (Accepted): 30 / 06 / 2021

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue diseñar un sistema Box Behnken para optimizar el rendimiento de un pico sistema solar fotovoltaico en el Valle del Mantaro en condiciones de alta densidad poblacional. Para ello se ubicó el sistema en una zona de moderada densidad urbana de la ciudad de Huancayo, región Junín, en la región central del Perú con coordenadas 12°03'29,0"S 75°13'12,9"W. Las mediciones se realizaron en la temporada de verano regional. Las variables evaluadas para su optimización en el Diseño Box Behnken fueron: orientación, ángulo de inclinación del panel solar y la hora de exposición. Se modeló el comportamiento mediante la superficie de respuesta para variables únicas y combinadas, comparándose la variación en la diferencia de potencial (V). Los resultados mostraron que la variable de mayor significación para la variación de potencial fue el ángulo de inclinación, con un efecto estandarizado de 3,48 y 95% de significancia. Todos los residuos del diagrama factorial se encontraron dentro de +0,8 y -0,8, indicando que el procedimiento experimental aplicando el método Box Behnken no presentó valores atípicos. Se concluyó que es posible maximizar la diferencia de potencial de un sistema de captación solar en el Valle del Mantaro, en una zona de alta densidad urbana, priorizando el ángulo de incidencia de radiación.

Palabras Clave: Sistema solar fotovoltaico, Box-Behnken, efectos normales, superficie de respuesta

ABSTRACT

The objective of the research was to design a Box Behnken system to optimize the performance of a peak photovoltaic solar system in the Mantaro Valley under conditions of high population density. For this, the system was located in a zone of moderate urban density in the city of Huancayo, Junín region, in the central region of Peru with coordinates 12 ° 03'29.0 "S 75 ° 13'12.9" W. Measurements were made in the regional summer season. The variables evaluated for optimization in the Behnken Box Design were: orientation, angle of inclination of the solar panel and time of exposure. Behavior was modeled using the response surface for single and combined variables, comparing the variation in the potential difference (V). The results showed that the variable of greatest significance for the potential variation was the angle of inclination, with a standardized effect of 3.48 and 95% significance. All the residuals of the factorial diagram were found within +0.8 and -0.8, indicating that the experimental procedure applying the Box Behnken method did not present outliers. It was concluded that it is possible to maximize the potential difference of a solar collection system in the Mantaro Valley, in an area of high urban density, prioritizing the angle of incidence of radiation.

Keywords: Photovoltaic solar system, Box-Behnken, normal effects, response surface

* Corresponding author.:
E-mail: adelzo@unpc.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la energía solar fotovoltaica y su masificación es una tendencia de hace pocos años. Esta tecnología contribuye a mitigar el daño ambiental y es una alternativa al consumo de combustibles fósiles. A esto se suma la reducción del gasto y los problemas de contaminación derivados, especialmente en poblaciones de bajos recursos, ampliando el alcance de la cobertura eléctrica [1], [2].

Esta tecnología convierte la radiación solar, absorbida por un material conductor o semiconductor, en corriente eléctrica a través del efecto fotovoltaico [3]. Actualmente, todas las celdas solares fotovoltaicas son fabricadas a partir de semiconductores de brecha directa de 1 eV a 2,5 eV, entre la banda de valencia y la de conducción [4].

El diseño Box Behnken puede ser aplicable para optimizar el rendimiento de los paneles solares fotovoltaicos. El uso del mismo permite ensayar varios factores simultáneamente, aislados o combinados, proporcionando una imagen de la influencia sobre el rendimiento final empleando la metodología de superficie de respuesta [5], [6].

El diseño Box Behnken es esférico, con todos los puntos localizados dentro de una esfera de radio 2. No contiene ningún punto en los vértices de la región cúbica creada por los límites superior e inferior de cada variable [7]. Se puede considerar como tres diseños factoriales entrelazados junto con un punto central [8]. Su representación geométrica se muestra en la Fig. 1. En este diseño, los puntos se ubican en medio de las aristas del cubo centrado en el origen. No se incluye diseño experimental en los vértices debido a su complejidad y poca significancia.

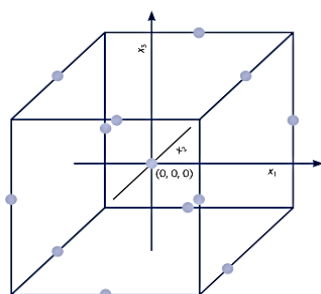


Fig. 1. Esquema del diseño Box-Behnken para tres factores [9].

La metodología de superficie de respuesta (RSM) permite optimizar procesos multifacéticos al generar datos que se ajusten a un modelo descriptivo de respuesta dentro de una región experimental [9]. Adicionalmente, RSM minimiza el número de ensayos necesarios para evaluar varios parámetros y sus

interacciones tras generar un modelo matemático [10], [11].

Sin embargo, no existen estudios en la región de Junín del Perú que optimicen los sistemas de captación de energía solar aplicando el diseño Box Behnken ni el RSM. En ese contexto, el objetivo de la presente investigación es optimizar el pico fotovoltaico de un sistema de captación de energía solar empleando el diseño Box Behnken y RSM considerando: orientación, ángulo de inclinación y el tiempo de exposición del panel solar en una zona urbana del Valle del Mantaro.

2. MATERIALES Y REACTIVOS

2.1 EQUIPO

El tipo de investigación fue tecnológica, nivel de investigación de estudios de comprobación de hipótesis causales y el método de investigación experimental. Para el desarrollo del proyecto se implementó un sistema solar fotovoltaico de 100 W y sus respectivos complementos. Los parámetros fotovoltaicos se muestran en la Tabla I, considerando la información técnica [12].

La validación de hipótesis se desarrolló a través del análisis de la varianza (ANOVA) y las pruebas de significación mediante la prueba F con un nivel de significación $\alpha = 0,05$.

TABLA I
Parámetros fotovoltaicos para el modelo de módulo Salvador Escoda KPV270.

Parámetro	Valor
Potencia nominal o máxima (PMÁX)	100 W
Tensión en circuito abierto (VOC)	38,33 V
Intensidad de cortocircuito (ISC)	9,03 A (CEM)
Tensión en el punto de máxima potencia (VMP o VMÁX)	32,18 V
Intensidad de corriente máxima (IM o IMÁX)	8,42 A

2.2 APLICACIÓN DE DISEÑO BOX BEHNKEN

El diseño Box-Behnken fue implementado para optimizar el funcionamiento del pico sistema solar. Los resultados fueron analizados considerando: el coeficiente de determinación, (R^2), el análisis de varianza (ANOVA), el diagrama de Pareto, diagramas de superficie de respuesta y diagramas de probabilidad normal de residuales. Un método de regresión no lineal fue empleado para ajustar el segundo orden polinomial para los datos experimentales y para identificar los términos relevantes del modelo [13].

La ecuación (1) representa el modelo de respuesta considerando todos los términos lineales, cuadráticos y los términos de interacción lineal-lineal.

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

Dónde: β_0 es el término compensatorio; β_i es el término dependiente o el efecto lineal del factor de entrada x_i ; β_{ii} es el efecto cuadrático del factor de entrada x_i y β_{ij} es el efecto de interacción lineal-lineal entre el factor x_i y x_j [13].

Se seleccionó como variables de estudio: al ángulo de inclinación en tres niveles 35° , 25° y 10° del panel solar, la orientación del panel solar al sur, este y norte y la hora de medición a las 12 h, 13 h y 14 horas, como se muestra en la Tabla II. Se parametrizaron las variables con los valores +1, 0 y -1 de forma que pudieran procesarse para el diseño Box Behnken y facilitar el modelamiento de la superficie de respuesta.

TABLA II
Variables y niveles del Diseño Box Behnken.

Niveles	Angulo	Orientación	Tiempo
+1	35°	SUR	12 h
-1	25°	ESTE	13 h
0	10°	NORTE	14 h

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL

En la Fig. 2 se indica la variación de la tensión entre los niveles estudiados para cada parámetro. El análisis independiente muestra que el ángulo de 35° a las 12 h es la combinación con mayor tensión registrada. Por otra parte, la orientación norte muestra una mayor tensión, como resultado de la mayor exposición a la radiación respecto al punto de muestreo. En el caso de las horas de muestreo, existe una fluctuación más lenta entre todos los niveles, siendo mayor la diferencia a las 12 h.

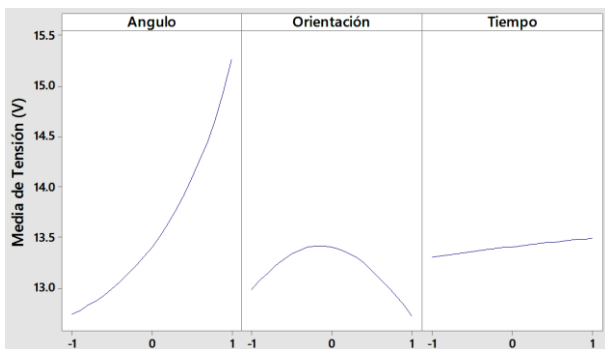


Fig. 2. Gráfica de efectos principales para tensión (V). Medidas ajustadas.

Empleando los resultados bidimensionales anteriores, se construyó la superficie de respuesta en la Fig. 3. El diagrama muestra un comportamiento

definido a través de los niveles 0, -1 y +1, sin perfiles ni curvas anómalas. Los resultados muestran que el principal parámetro que influyó en el incremento de la magnitud de la tensión fue el ángulo de incidencia de radiación.

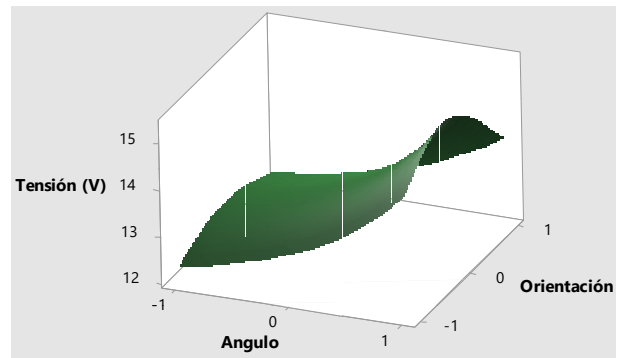


Fig. 3. Gráfica de superficie de Tensión (V) vs Orientación y ángulo.

Adicionalmente, se determinaron los efectos normales absolutos estandarizados de las variables estudiadas, con un nivel de confianza $\alpha = 0,05$. La Fig. 4 muestra que la principal variable que influyó sobre la potencia de radiación registrada fue el ángulo, con un efecto estandarizado de 3,48 y 95% de significancia.

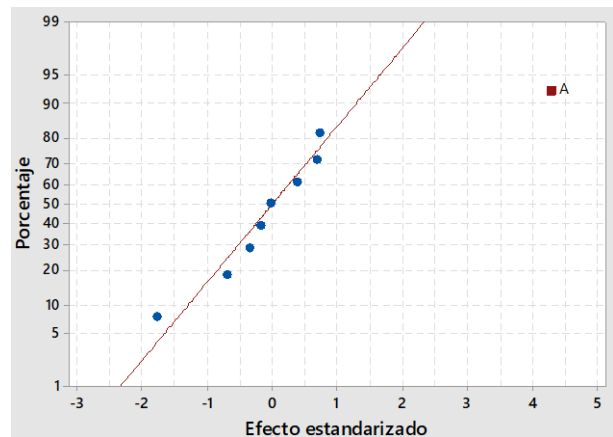


Fig. 4. Gráfica normal de efectos estandarizados (la respuesta es la Tensión (V); $\alpha = 0,05$). Los marcadores azules indican efectos no significativos (orientación y tiempo) y el marcador rojo efectos significativos (ángulo de incidencia).

3.2 OPTIMIZACIÓN DE POTENCIA REGISTRADA

El diagrama de Pareto de los efectos estandarizados, con un tratamiento individual y combinado de las variables, muestra un nivel elevado de significancia para el ángulo de inclinación, seguido del efecto combinado de la orientación consigo misma (Fig. 5). Es notable que, en ningún caso, el tiempo de toma de muestra tenga un efecto significativo en la potencia registrada en el panel solar.

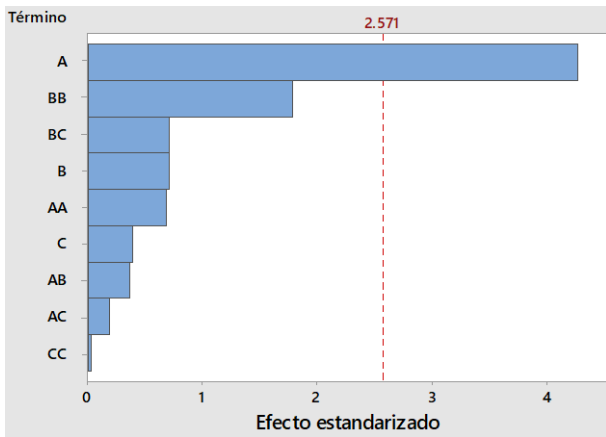


Fig. 5. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados (la respuesta es Tensión (V); $\alpha = 0,05$). A: ángulo de incidencia; B: Orientación; C: Tiempo.

Del diagrama de optimización (Fig. 6) es posible deducir que la variable ángulo tuvo una tendencia ascendente marcada, diferenciada de la variable orientación que marca una curva ligeramente ascendente y luego descendente. La variable de tiempo presentó una tendencia descendente de menor pendiente.

Dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta cuando el efecto de uno depende del nivel en que está el otro [9]. En base a esto, se construyó la Fig. 7 en el que se muestra la interacción ángulo-orientación con un efecto muy significativo; comparado con las interacciones orientación-tiempo y ángulo-tiempo.

Considerando el diagrama factorial, cerca de 68% de los residuales estandarizados deberían estar incluidos dentro de los límites de ± 1 , cerca de 95% deberían estar incluidos dentro de ± 2 y, virtualmente, todos ellos deberán estar incluidos en el límite ± 3 . Un residual mayor a 3 o 4 desviaciones estándar a partir de cero es un punto atípico potencial [7] para el diseño Box-Behnken [14].

En el diagrama de residuos, según el orden de observación, se determinó que todos los residuos se encontraron dentro de $+0,8$ y $-0,8$. El resultado indica que todo el procedimiento experimental aplicando el método Box Behnken, no presentó valores atípicos que evidencie fallas en su ejecución y análisis posterior.

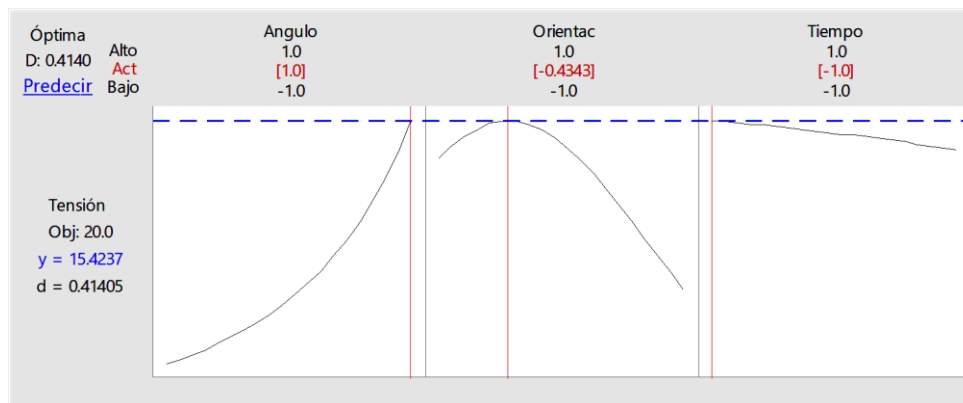


Fig.6. Diagrama de optimización. Las líneas verticales rojas indican el máximo de tensión obtenida.

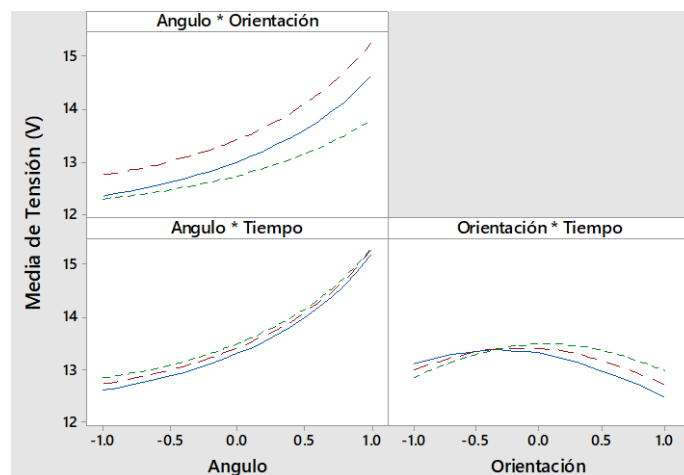


Fig. 7. Diagrama factorial de interacción ángulo + orientación, ángulo + tiempo y orientación + tiempo para Tensión (V). La línea azul representa el parámetro [-1], la roja [0] y la verde [+1]

CONCLUSIONES

- Se implementó la metodología de investigación experimental Box Behnken, en un pico sistema solar fotovoltaico de 100 w, y se seleccionaron tres variables de estudio: el ángulo de inclinación del panel solar, la orientación del panel solar y el tiempo de levantamiento de información en tres niveles.
- La variable de mayor significación para la variación de potencial fue el ángulo de inclinación, con un efecto estandarizado de 3,48 y 95% de significancia.
- Todos los residuos del diagrama factorial se encontraron dentro de +0,8 y -0,8, indicando que el procedimiento experimental aplicando el método Box Behnken no presentó valores atípicos.
- Por lo tanto, posible maximizar la diferencia de potencial de un sistema de captación solar en el Valle del Mantaro, en una zona de alta densidad urbana, priorizando el ángulo de incidencia de radiación.

REFERENCIAS

- [1] A. Beltrán-Telles et al., “Prospectiva de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica”. *Ciencia UAT*, vol. 11, no. 2, pp. 105–117, 2017.
- [2] P. Owusu y S. Asumadu-Sarkodie. “A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation”. *Cogent Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 1-14, 2016.
- [3] J. Barbosa et al., “Estudio para el uso de la tecnología solar fotovoltaica”. *Revista de la Universidad Cooperativa de Colombia*, vol. 6, no. 1, pp. 1–13, 2010.
- [4] G. Arencibia-Carballo, “La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica.”, *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, vol. 17, no. 9, pp. 1–4, 2016.
- [5] D. Li et al., “Box-Behnken experimental design for investigation of microwave-assisted extracted sugar beet pulp pectin. Carbohydrate”. *Polymers*, vol. 88, no. 1, pp. 342–346, 2012.
- [6] G. Box, J. Hunter, y W. Hunter, *Estadística para investigadores*. Madrid, MA, España: Reverté, 2008.
- [7] D. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. México DF, MX, México: Limusa Wiley, 2004.
- [8] J. Zolgharnein et al., “Comparative study of Box-Behnken, central composite, and Doehlert matrix for multivariate optimization of Pb (II) adsorption onto Robinia tree leaves”. *Journal of Chemometrics*, vol. 27, no. 1, pp. 12–20, 2013.
- [9] H. Gutiérrez y R. De la Vara, *Análisis y diseño de experimentos*. México DF, MX, México: Mc Graw Hill, 2008
- [10] B. Tak et al., “Optimization of color and COD removal from livestock wastewater by electrocoagulation process: Application of Box-Behnken design (BBD)”. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 28, no. 1, pp. 307–315, 2015.
- [11] G. Swamyet al., “Response surface modeling and process optimization of aqueous extraction of natural pigments from Beta vulgaris using Box-Behnken design of experiments”. *Dyes and Pigments*, vol. 111, no. 1, pp. 64–74, 2014.
- [12] S. Escoda, *Libro Blanco de las Energías Renovables*. México DF, MX, México: ESCODA S.A., 2018.
- [13] A. Jaramillo et al., “Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores.”. *Ingeniería y Ciencia*, vol. 9, no. 18, pp. 75–91, 2013.
- [14] J. Maran et al., “Box-Behnken design based multi-response analysis and optimization of supercritical carbon dioxide extraction of bioactive flavonoid compounds from tea (*Camellia sinensis* L.) leaves”. *Journal of Food Science and Technology*, vol. 52, no. 1, pp. 92–104, 2015.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe