

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UN MODELO DE INVERSOR PARA SISTEMA FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED: AJUSTE BASADO EN ALGORITMO GENÉTICOS

Roberto Federico Farfán – farfan.roberto.f@gmail.com

Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería, INENCO.

Cesar Wilhelm Massen Prieb – cprieb@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LABSOL.

Carlos Alberto Cadena – cadenacinenco@gmail.com

Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, INENCO

Resumen. El objetivo de este trabajo es caracterizar inversores para sistemas fotovoltaicos conectados a la red, por medio del ajuste de parámetros de un modelo, implementando algoritmos genéticos. El modelo utilizado se presentó en el año 2007 por Sandia National Laboratories (King et al., 2007) y relaciona las magnitudes eléctricas que se encuentran en las hojas de datos de los fabricantes de inversores con la potencia del conjunto de módulos fotovoltaicos y la potencia de salida. El modelo permite incorporar la tensión del conjunto de módulos como variable de entrada, lo que permite desarrollar cálculos más confiables y obtener un comportamiento más real del inversor, pero también complejiza el trabajo de ajuste. Los parámetros del modelo se determinan utilizando como datos de entrada la información que brinda las curvas de eficiencia de conversión, obtenida de la hoja de datos del inversor o medidas en el laboratorio. En el trabajo se desarrolla la metodología implementada y se compara los resultados obtenidos con los que indica el fabricante de inversores. Se espera que la metodología desarrollada permita mejorar las simulaciones de los inversores utilizados en sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Palabras clave: Energía Solar, Fotovoltaico, Inversores.

1. INTRODUCCIÓN

La energía que puede generar un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red (SFCR) se relaciona con la potencia nominal de los módulos y el inversor, así como también con parámetros meteorológicos del lugar. En un SFCR los inversores pueden trabajar con diferentes configuraciones, entre las que podemos nombrar: inversor central, inversor *string*, módulo AC (microinversores) o inversor *multi-string* (Joydip et al., 2017; Luque and Hegedus, 2011). Los inversores para SFCR en la actualidad se consideran dispositivos muy eficientes y confiables, debido en gran parte al desarrollo de la electrónica de potencia. Los primeros desarrollos en los años ochenta trabajaban con tiristores y en la actualidad, se utiliza tecnología MOSFET e IGBT. El inversor dentro de un SFCR cumple diferentes funciones, que pueden analizarse con profundidad estudiando su modelo físico.

Existen diferentes expresiones para modelar el comportamiento de un inversor para SFCR. Los modelos buscan relacionar la potencia de entrada (P_{DC}) con la potencia de salida del inversor (P_{AC}), utilizando por ejemplo, las curvas de eficiencia de conversión (η_{CON}) (Jantsch et al., 1992, Farfán et al., 2018). En la bibliografía también se encuentran modelos que vinculan la potencia de salida con las características eléctricas que los fabricantes de los inversores declaran (King et al., 2007). Los modelos cumplen un papel importante en las simulaciones de los SFCR, ya que permiten determinar de forma precisa la inyección de energía en la red, la eficiencia del sistema y su degradación, entre otros. Estos estudios cobran relevancia, ya que se encuentran relacionados con el análisis de factibilidad de un proyecto para SFCR.

Teniendo en cuenta el comportamiento real de un inversor, determinar la producción de energía de un SFCR con la eficiencia del inversor como un valor constante, es lo mismo que asumir que la eficiencia del inversor es lineal en su rango operativo, lo cual es un error (King et al., 2007). La η_{CON} está relacionada con el voltaje (V_{DC}) y la potencia de entrada de un inversor (King et al., 2007). Es por ello que obtener información acerca del comportamiento del inversor respecto a la P_{DC} y V_{DC} es relevante, aunque por lo general no se encuentra información acerca de cuál es el nivel de voltaje de CC óptimo en la entrada de un inversor para lograr la mayor eficiencia ponderada. La falta de información acerca de esta relación influye directamente en el rendimiento de toda el SFCR (Baumgartner et al., 2007).

Debido a esto, el objetivo de este trabajo es determinar los parámetros de un modelo de inversor para SFCR, ya sea con datos medidos en el laboratorio o con datos obtenidos de la η_{CON} que el fabricante declara en la hoja de datos. Para cumplir con este propósito se utilizó un ajuste basado en algoritmos genéticos (Eibe and Smith, 2015). El algoritmo define como población parámetros eléctricos del inversor que evolucionan a medida que se realiza el ajuste, que consiste en minimizar el error entre los datos de entrada y los datos generados por el modelo. En el estudio solo se considera la η_{CON} , teniendo en cuenta que la eficiencia de seguimiento del punto de máxima potencia (η_{MPPT}) suele ser elevada. El modelo

permitirá simular el comportamiento de un inversor para SFCR de manera precisa, como también calcular su P_{AC} en base a la V_{DC} y la P_{DC} .

2. INVERSOR PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED

Los inversores utilizados en los SFCR son el puente para la inyección de energía a la red proveniente de los módulos fotovoltaicos. La función más importante del inversor desde el punto de vista de su modelado es: la búsqueda del punto de máxima potencia y la conversión de corriente continua (I_{DC}) proveniente de los módulos a corriente alterna (I_{AC}).

2.1 Modelo de Inversor

Existen diferentes expresiones para modelar el comportamiento de un inversor para SFCR, entre ellas podemos nombrar la que presentó en el año 2007 Sandia National Laboratories (King et al., 2007). Este modelo permite simular de manera detallada un inversor a nivel de *hardware* o sistema de control, como por ejemplo para la predicción del comportamiento a largo plazo. El modelo relaciona en un principio, la P_{AC} en función de la P_{DC} . Desde un punto de vista práctico, en la Fig. 1 se observan medidas de P_{DC} y P_{AC} para una V_{DC} definida, utilizando todo el rango de potencia entrada.

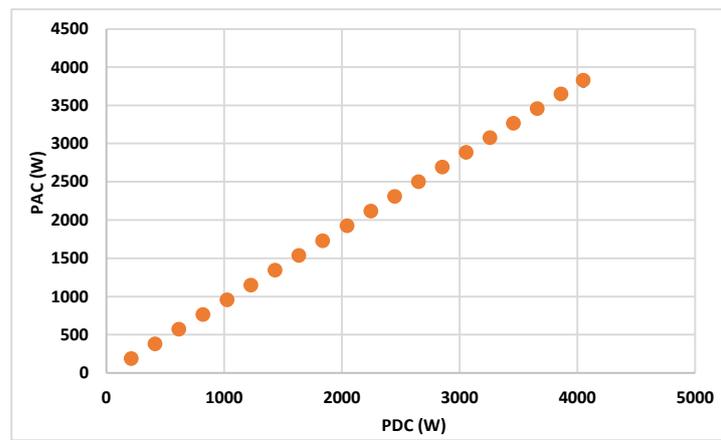


Figura 1 - Resultados obtenidos del ensayo de un inversor SMA3800, manteniendo $V_{DC}=215V$.

La relación entre la P_{AC} y P_{DC} parece ser lineal. Sin embargo, debido a la potencia consumida por el propio inversor, así como las características eléctricas de los circuitos del inversor para diferentes niveles de voltaje y potencia, dan como resultado diferentes grados de no linealidad en esta relación (King et al., 2007). Si bien en la Figura 1 no se percibe este efecto, en la curva de η_{CON} se aprecia de forma notoria esta no linealidad existente entre la potencia de CA y CC, como se observa en la Fig. 2.

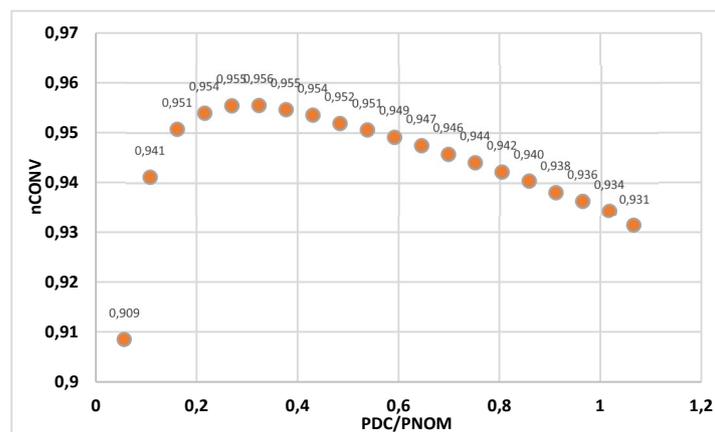


Figura 2 - Eficiencia de conversión para un inversor SMA3800, manteniendo $V_{DC}=215V$.

La Ec. (1) define el modelo utilizado para relacionar la P_{AC} y P_{DC} , utilizando la potencia de los módulos como variables independientes. Los parámetros con el subíndice “o” son valores que definen una condición de operación de referencia.

$$P_{CA} = \left(\frac{P_{NOM}}{(P_{dco} - P_{so})} - C_o(P_{dco} - P_{so}) \right) (P_{DC} - P_{so}) + C_o(P_{DC} - P_{so})^2 \quad (1)$$

El parámetro P_{dco} representa el nivel de potencia de CC en el cual se alcanza la potencia nominal en CA en W, P_{so} representa la potencia de CC necesaria para iniciar el proceso de inversión o autoconsumo del inversor en W y C_o es un parámetro que define la curvatura en la relación entre P_{AC} y P_{DC} en condición de operación en 1/W.

Para mejorar el modelo de inversor y determinar con precisión la P_{AC} , teniendo en cuenta que la eficiencia de conversión no es un valor constante y depende del voltaje de entrada, los parámetros P_{dco} , P_{so} y C_o pueden definirse en función de la tensión de entrada V_{DC} como indican las siguientes expresiones.

$$P_{dco} = P_{dco0}(1 + C_1(V_{DC} - V_{DC0})) \quad (2)$$

$$P_{so} = P_{so0}(1 + C_2(V_{DC} - V_{DC0})) \quad (3)$$

$$C_o = C_{o0}(1 + C_3(V_{DC} - V_{DC0})) \quad (4)$$

V_{dco} es el nivel de voltaje de CC en donde se alcanza la potencia nominal de CA en la operación de referencia en V, C_1 es el coeficiente empírico que permite que modelar la variación lineal de P_{dco} en función del voltaje de entrada (1 / V), C_2 es el coeficiente empírico que permite modelar la variación lineal de P_{so} en función del voltaje de entrada (1/V) y C_3 es el coeficiente empírico que permite modelar la variación lineal de C_o con respecto al voltaje de entrada (1 / V).

2.2 Idealización del modelo

El modelo planteado en este trabajo no tiene en cuenta la η_{MPPT} para el cálculo de la P_{AC} . Esto se debe a que la mayoría de los inversores fabricados en la actualidad tienen una eficiencia de MPPT alta, encima del 98% y en muchos casos, prácticamente el 100% (King et al., 2007). Por otro lado, determinar la η_{MPPT} no es una tarea sencilla, ya que requiere de mediciones simultáneas de P_{DC} y el punto de máxima potencia del campo fotovoltaico. Si bien en los ensayos realizados se determinó la η_{MPPT} y la η_{CONV} del inversor, en el trabajo solo se ha considerado esta última. Esto se debe a que las mediciones que los usuarios por lo general realizan sobre los inversores permiten determinar la η_{CONV} y por lo tanto, su aplicación es más útil en esta última situación.

3. ENSAYO Y HOJA DE DATOS DE INVERSORES

Para determinar los parámetros del modelo de inversor se realizaron ensayos donde se calculan las curvas de η_{CONV} . También se obtuvieron los puntos de las curvas de η_{CONV} que declara el fabricante en las hojas de datos, utilizando un *software* que permite recuperar esta información para su posterior implementación.

3.1 Ensayo de Inversor

Para determinar las curvas η_{CONV} se utilizó una fuente de cuatro cuadrantes que se conecta a la entrada del inversor para emular el conjunto de módulos fotovoltaicos. Las medidas en los ensayos se realizaron por medio de un analizador de energía WT500 Yokogawa. El emulador de módulos fotovoltaicos es de la marca Regatron TopCon Quadro, TC.P.16.600.400.S, de fabricación Suiza. Esta fuente programable de 16 kW, 600 V_{DC} y 32 A de salida, necesita del *software* SAScontrol para poder operar. En la Fig. 3 se observan las fuentes, el inversor y el analizador de energía utilizados en los ensayos.



Figura 3 - Simulador de módulos fotovoltaicos, analizador de energía e inversor.

El *software* permite configurar y manejar los parámetros de la fuente, programando los cargamentos del inversor o simulando la variación de la curva $I-V$ mediante datos de irradiancia y temperatura de módulo. El inversor ensayado en este trabajo es el SunnyBoy 3800U, cuyas características se especifican en la Tab. 1.

Tabla 1 – Especificaciones del inversor SMA 3800U.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima Potencia (DC)	4040 W
Voltaje Máximo (DC)	500 V
Rango de Voltaje (DC)	200 V-400 V
Máxima Corriente (DC)	20 A
Potencia Nominal (AC)	3800
Rango de voltaje nominal (AC)	180-265V
Corriente máxima (AC)	18 A
Consumo interno	7W

Para este inversor se desarrollaron ensayos con diferentes cargas hasta su potencia nominal. Si bien el fabricante indica que el inversor puede trabajar entre 200~400 V, se observó que la tensión más baja para conectarse es 215 V. Por lo tanto se ensayó el inversor entre el rango de 215~400 V. Después de los ensayos, se realizó el procesamiento de la información, determinándose las curvas de η_{MPPT} y las curvas de η_{CON} para cada tensión de trabajo. Se obtuvieron alrededor de 20 curvas de eficiencia con 20 puntos cada una. En la Fig. 4 se observan las curvas obtenidas.

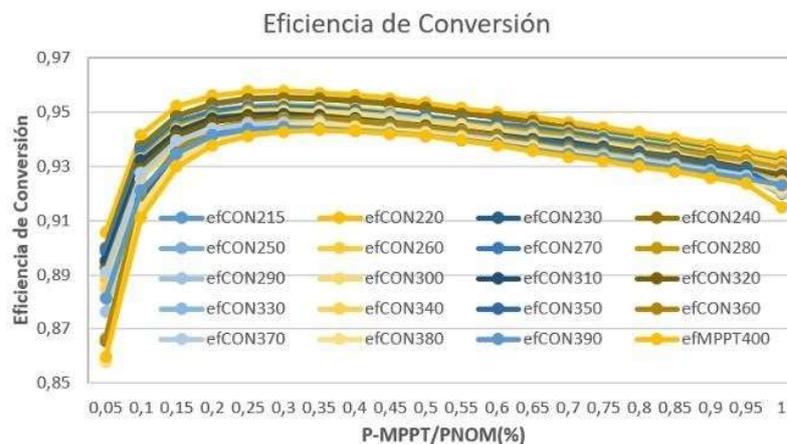


Figura 4 - Curvas de Eficiencia de Conversión medidas del SMA SunnyBoy 3800U.

3.2 Obtención de curvas de eficiencias de las hojas de datos

Los fabricantes de inversores incorporan en las hojas de datos, información donde describen las características eléctricas de sus dispositivos, así como también las curvas de ensayos de η_{CON} medidas bajo determinadas condiciones de temperatura, potencia y tensión de entrada. En este trabajo se utilizó la hoja de datos del inversor Sunny Mini Central 7000HV para determinar las curvas de η_{CON} . En la Fig. 5 se observa el gráfico de las mismas, una vez que se determinaron los puntos de las curvas haciendo uso de un *software* que permite recuperar esta información si las curvas se encuentran en un archivo de imagen.

Tabla 2 – Especificaciones del inversor SMA Sunny Mini Central 7000HV.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima Potencia (DC)	7500 W
Voltaje Máximo (DC)	800 V
Rango de Voltaje (DC)	335~560 V
Máxima Corriente (DC)	23 A
Potencia Nominal (AC)	6650 W
Rango de voltaje nominal (AC)	180~260V
Corriente máxima (AC)	31 A
Consumo interno	0,25W

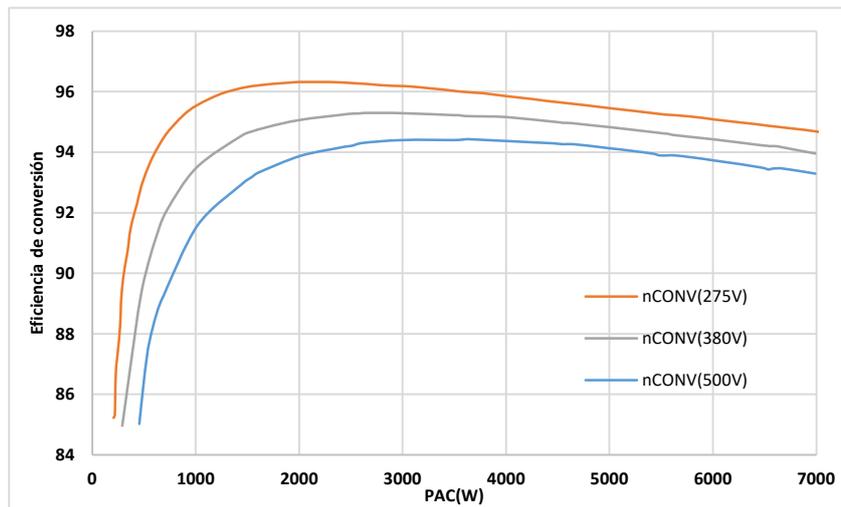


Figura 5 - Curvas de Eficiencia de Conversión SMA Sunny Mini Central 7000HV.

3.3 Determinación de los parámetros del modelo

Para determinar los parámetros del modelo se utilizaron como datos de entrada veinte curvas de η_{CON} , obtenidas de los ensayos del inversor SunnyBoy 3800 y tres curvas de η_{CON} obtenidas de la hoja de dato del inversor Sunny Mini Central 7000HV. En el trabajo original (King et al., 2007), los autores determinan los parámetros P_{dco} , P_{so} y C_o con los datos de cada curva de η_{CON} (V_{DC}). Del conjunto de curvas de η_{CON} , se obtienen diferentes valores de P_{dco} , P_{so} y C_o , que se utilizan para realizar las correspondientes regresiones lineales que describen las expresiones (2), (3) y (4). De esta forma se determina un modelo de inversor que depende de V_{DC} .

A diferencia de la metodología original, en este trabajo se utiliza toda la información de las curvas de η_{CON} para determinar en un ajuste, los parámetros P_{dco0} , C_1 , V_{dco} , P_{so0} , C_2 , C_3 y C_o0 . La importancia de esta metodología radica en que solo se debe seleccionar el parámetro del modelo que se desea determinar, utilizando los datos de las curvas de η_{CON} , como datos de entrada. Por ejemplo, una variable en el problema podría ser P_{NOM} . El algoritmo determinaría un valor de P_{NOM} , ajustado en un entorno de búsqueda alrededor de la P_{NOM} que declara el fabricante. En este trabajo se determinó V_{dco} , un valor que se encuentra definido en el modelo y que por lo general no se incluye en la hoja de datos del fabricante.

El algoritmo de ajuste consiste en un programa basado en R, implementando algoritmos genéticos como herramienta de ajuste. El algoritmo permite crear una población de P_{dco0} , C_1 , V_{dco} , P_{so0} , C_2 , C_3 y C_o0 en un entorno definido por el usuario. Las evoluciones de las poblaciones permiten el cálculo de la potencia de salida del inversor, utilizando el modelo descripto ($P-AC_{salida}$), la cual se compara con la potencia de salida real medida en los ensayos ($P-AC_{medida}$). El algoritmo minimiza el valor absoluto de las diferencias entre $P-AC_{salida}$ y $P-AC_{medida}$ al evolucionar las poblaciones de P_{dco0} , C_1 , V_{dco} , P_{so0} , C_2 , C_3 y C_o0 . En la Fig. 5 se observa cómo disminuye el valor medio del valor absoluto de la resta entre $P-AC_{salida}$ y $P-AC_{medida}$ de la población, a medida que esta evoluciona.

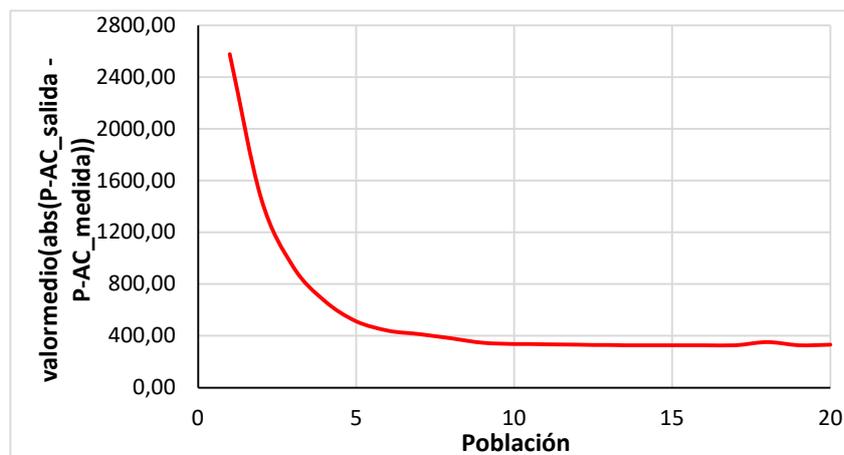


Figura 5: Valor medio del valor absoluto entre la resta de $P-AC_{salida}$ y $P-AC_{medida}$ en función de la evolución de la población para el inversor SunnyBoy 3800U.

Los entornos donde se generan la población para el algoritmo, se definen en base a lo que indican las hojas de datos de los inversores. Para P_{dco} del inversor SunnyBoy 3800U, se tuvo en cuenta la potencia máxima de entrada, 4040W como

indica la Tab. 1. El algoritmo crea una población entre los 3800W a 4100W (un 2% encima del máximo) y en base a los parámetros del ajuste, se realiza la búsqueda. Para el parámetro P_{so} , el entorno de búsqueda se realizó ente 0W a 8W, teniendo en cuenta que el fabricante indica su valor se encuentra alrededor de 7W, como indica la tabla 1. Debido a la linealidad entre P_{AC} y P_{DC} , los mejores ajustes para C_0 se obtuvieron para un entorno definido entre 0 y 1.

Del ajuste realizado se obtuvieron los valores de P_{dco0} , C_1 , V_{dco} , P_{so0} , C_2 , C_3 y Co_0 , para las curvas obtenidas de los ensayos y las curvas obtenidas de la hoja de datos. En las Figuras 6 y 7 se observa la gráfica de las funciones P_{dco} y P_{so} para cada inversor, en base a V_{DC} y los parámetros P_{dco0} , C_1 , P_{so0} , C_2 y V_{dco} determinados en el ajuste.

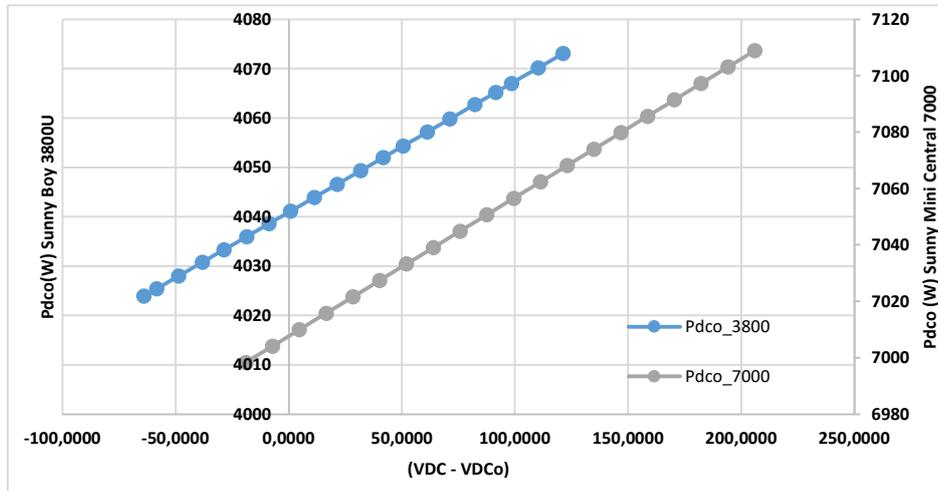


Figura 6 - Ajuste para determinar la función P_{dco} .

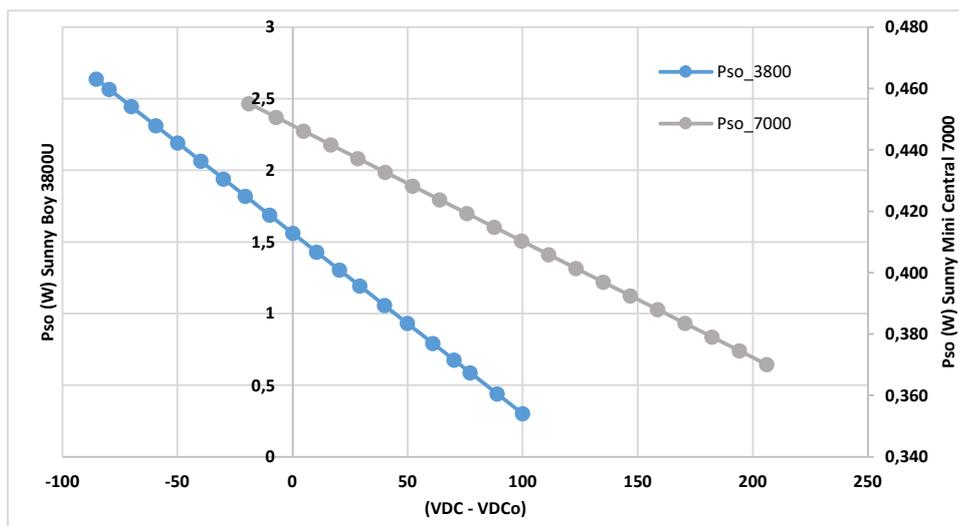


Figura 7 - Ajuste para determinar la función P_{so} .

3.4 Resultados

De los ajustes realizados se obtienen los siguientes parámetros del modelo de inversor:

Tabla 3 – Parámetros del modelo para el inversor SunnyBoy 3800U y Sunny Mini Central 7000.

PARÁMETRO	Sunny Boy 3800U	Sunny Mini Central 7000
P_{dco0}	4040,94	7007,7
C_1	$6,566 \times 10^{-5}$	$7,0159 \times 10^{-5}$
V_{dco}	278,64	353,98
P_{so}	1,832	0,448
C_2	-0.00688	-0.0008437
Co_0	$4,75 \times 10^{-7}$	$1,7207 \times 10^{-8}$
C_3	$3,93 \times 10^{-5}$	$6,085 \times 10^{-5}$

Con la información obtenida de las mediciones de inversor SunnyBoy 3800U, se realizaron las curvas de nivel de η_{CON} , como se observa en las Figs. 8 y 9. Estas curvas indican en base a la información medida, el comportamiento η_{CON} , respecto a la V_{DC} y la P_{DC} . Las curvas de nivel indican que a medida que la V_{DC} es más baja, la η_{CON} del inversor es más alta. En este grafico se observa de forma clara la variación de la η_{CON} en función de la tensión de máxima potencia (VDC-MPPT) y el porcentaje de la potencia nominal de entrada (P-MPPT/PNOM). En las gráficas se observa que la máxima η_{CON} se encuentra entre 0,95 a 0,96 y se consigue cuando el inversor opera en tensiones inferiores a los 300V y entre un 10 a un 60 % de la potencia nominal.

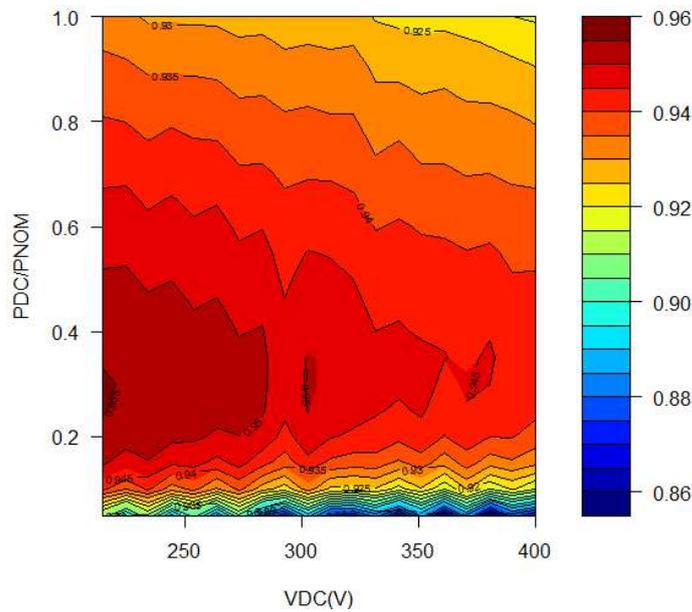


Figura 8: Curva de η_{CON} del inversor SunnyBoy 3800U.

Por otro lado, se observa que los datos obtenidos de las curvas de η_{CON} del inversor Sunny Mini Central 7000, tienen una respuesta similar al anterior. En la Fig. 9 se observa el comportamiento η_{CON} , respecto a la V_{DC} y la P_{AC} .

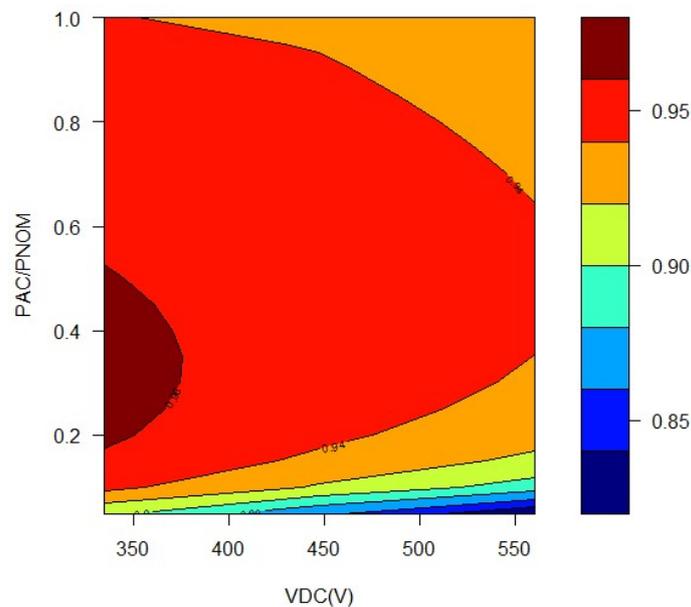


Figura 9: Curva de η_{CON} del inversor Sunny Mini Central 7000.

Las curvas indican que a medida que la V_{DC} es más baja, la η_{CON} del inversor es más alta. En la Fig. 9 se observa la variación de la η_{CON} en función de la tensión de máxima potencia (VDC-MPPT) y el porcentaje de la potencia nominal a la salida (P_{AC}/P_{NOM}). El gráfico indica que la máxima η_{CON} se encuentra entre 0,96 a 0,97 y se la consigue cuando el inversor trabaja con tensiones inferiores a los 300V y entre un 10 a un 60 % de la potencia nominal.

El comportamiento que describen las curvas de nivel se encuentran caracterizados por las que se ajustaron en el trabajo expuesto. La información que se muestra las Figs. 6, 7, 8 y 9, indica cómo cambia la respuesta que da un inversor para SFCR, respecto a la P_{AC} , la P_{DC} y la V_{DC} .

3.5 Conclusiones

En el trabajo se determinaron los parámetros de un modelo de inversor para SFCR, utilizando información de las curvas de η_{CON} como datos de entrada para el algoritmo de ajuste. Para cumplir con los objetivos se realizaron ensayos a un inversor SMA 3800U, del cual se obtuvieron veinte curvas de η_{CON} para ajustar los parámetros del modelo. También se determinaron tres curvas de η_{CON} , obtenidas de la hoja de datos del inversor Sunny Mini Central 7000HV, para implementar el mismo cálculo. La metodología implementada en este trabajo permitió utilizar toda la información de las curvas de η_{CON} para determinar en un ajuste, los parámetros P_{dco0} , C_1 , V_{dco} , P_{so0} , C_2 , C_3 y $Co0$. El inconveniente en esta forma de trabajo radica en que deben definirse entornos de búsqueda (poblaciones) de parámetros que en un principio se desconocen, como C_1 , V_{dco} , C_2 , C_3 y $Co0$. Esto lleva a que el ajuste se tenga que realizarse más de una vez en algunas situaciones, hasta encontrar una población donde la diferencia entre la potencia de salida del modelo y la potencia medida, sea mínima. Sin embargo, la ventaja de la metodología implementada se encuentra en que las variables de ajuste en el modelo no tiene una limitación. En el trabajo se realizó el ajuste de 7 variables (P_{dco0} , C_1 , V_{dco} , P_{so0} , C_2 , C_3 y $Co0$) de forma simultánea, pero se podrían agregar más, como la P_{NOM} del inversor. De acuerdo a los resultados obtenidos, se espera que los ajustes realizados permitan obtener modelos de inversores para SFCR que trabajen de una forma más real, de manera que las simulaciones de SFCR sean más confiables.

REFERENCIAS

- Baumgartner, F. P., Schmidt, H., Burger, B., Bründlinger, R., Häberlin, H. and Zehner, M., 2007. Status and relevance of the DC voltage dependency of the inverter efficiency, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.
- Eibe A.E. and Smith J.E., 2015. Introduction to Evolutionary Computing, Springer.
- Farfán R.F., Prieb C.W.M. y Krenzinger A., 2018. Análisis de dos modelos matemáticos de inversores para el estudio de la variación de la eficiencia de conversión con respecto a la tensión de entrada, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.
- Jantsch M, Schimidt H, Schmid J., 1992. Results of the concerted action on power conditioning and control. Proceedings of the 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux, Suíça; p. 1589–93.
- Joydip Jana, Hiranmay Saha, Konika Das Bhattacharya, 2017. A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 72 (2017) 1256–1270.
- King, D.L., Gonzalez S., Galbraith, G.M. and Boyson, W.E., 2007. Performance Model for Grid-Connected Photovoltaic Inverters, SANDIA REPORT, SAND2007-5036.
- Luque A. and Hegedus S., 2011. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition, John Wiley and Sons, Ltd., Publication.

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF AN INVERTER MODEL FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS CONNECTED TO THE Grid: ADJUSTMENT BASED ON GENETIC ALGORITHM

Abstract. *The objective of this work is to characterize grid-tie photovoltaic inverters by adjusting the parameters of a model implemented with genetic algorithms. The used model was presented in 2007 by Sandia National Laboratories (King et al., 2007) and relates the electrical values from manufacturers data sheets to the power of the of photovoltaic array and the output power. The model allows incorporating the array voltage as an input variable, resulting in more reliable calculations, better reflecting the real behavior of the inverter. In other hand, it makes adjusting the model a more complex task. The model parameters are determined using as input the information provided from conversion efficiency curves, either from the inverter data sheet or measured in the laboratory. In this work, the implemented methodology is presented and the obtained results are compared with those indicated by the inverter manufacturer. This methodology is expected to improve the simulations of the inverters used in grid-tie photovoltaic systems.*

Key words: *Solar Energy, Photovoltaic, Inverters.*