

## MODELADO DE INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED

<sup>1</sup>Roberto Federico Farfán, <sup>2</sup>César Wilhelm Massen Prieb, <sup>3</sup>Carlos Alberto Cadena

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, U.N.Sa. Avda. Bolivia 5150 – Salta, Argentina.

<sup>2</sup>LABSOL, Escola de Engenharia, U.F.R.G.S., Av. Bento Gonçalves 9500 – Porto Alegre, Brasil.

<sup>3</sup>INENCO, Facultad de Ciencias Exactas, U.N.Sa. Avda. Bolivia 5150 – Salta, Argentina.

[farfan.roberto.f@gmail.com](mailto:farfan.roberto.f@gmail.com), [cprieb@ufrgs.br](mailto:cprieb@ufrgs.br), [cadenacinenco@gmail.com](mailto:cadenacinenco@gmail.com)

**RESUMEN:** El objetivo de este trabajo es modelar la respuesta de un inversor para sistemas fotovoltaicos conectados a la red, relacionando la potencia de salida con la tensión y potencia del conjunto de módulos fotovoltaicos. En el trabajo se utilizaron mediciones reales de un inversor SMA 3800U que permite validar un modelo de inversor presentado en el año 2007 por Sandia National Laboratories (King et al., 2007). Para este estudio se realizaron ensayos mediante los cuales se obtuvieron veinte curvas de eficiencia de conversión, correspondientes a veinte tensiones diferentes de entrada, las cuales se utilizan para determinar los parámetros del modelo de inversor. Los ensayos se realizaron en el LABSOL (Laboratorio de Energía Solar), en la Universidad Federal de Rio Grande del Sur, Brasil (UFRGS). El modelo implementado se caracteriza por vincular parámetros que se encuentran en las hojas de datos de los fabricantes de inversores, junto a la potencia y la tensión de entrada. En el trabajo se realizaron ensayos mediante una fuente programable que simula la variación de las curvas I-V en la entrada del inversor a lo largo de un día, para estudiar y validar el modelo propuesto. Los resultados obtenidos de los ensayos que se muestran en las figuras, permiten apreciar que el modelo entrega resultados precisos. Sin embargo, la linealidad entre ciertas relaciones de potencia respecto a la tensión de entrada podría mejorarse.

**Palabras clave:** Energía Solar, Fotovoltaico, Inversores, Irradiancia

### INTRODUCCIÓN

En un contexto a nivel mundial en donde existe preocupación por el calentamiento global, por la reducción de los recursos de combustibles fósiles y por el aumento del precio del petróleo, cobra importancia el concepto de generación distribuida, sobre todo si estos utilizan energías renovables (Mikati et al., 2012; Trejos et al. 2012). Entre los sistemas de energías renovables más desarrollados se encuentran los sistemas fotovoltaicos (FV). Estos sistemas convierten la energía de la radiación solar en energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas (Duffie and Beckman, 1991). Estas celdas se montan en una placa y se conectan entre sí formando una matriz denominado módulo FV. El aprovechamiento óptimo de la energía que produce un conjunto de módulos fotovoltaicos, depende de parámetros internos relacionados con sus características constructivas y calidad de las celdas fotovoltaicas que lo conforman, como así también de parámetros externos como la irradiancia y la temperatura (De Soto et al., 2006). La energía en forma de corriente continua (CC) generada por un conjunto de módulos FV, se puede convertir a corriente alterna (AC) por medio de un inversor y este último, puede volcarla a la red de energía convencional (Luque and Hegedus, 2011). Un sistema FV con estas características se denomina sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR).

La energía que puede generar un SFCR depende de la potencia nominal de los módulos y del inversor, así como también de 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 (inversores integrados a los módulos) o inversor *multi-string* (Joydip et al., 2017; Luque and Hegedus, 2011). La tecnología de los inversores mejoró mucho con el paso del tiempo. Los primeros desarrollos en los años ochenta trabajaban con tiristores y en la actualidad la electrónica de potencia mejora con la tecnología MOSFET e IGBT. Este desarrollo trajo como consecuencia grandes mejoras en los inversores, volviéndolos dispositivos más eficientes y confiables.

Estudiar las características de los inversores permite realizar estimaciones acerca del comportamiento de los SFCR, como la inyección de la energía a la red, la eficiencia de los sistemas, su degradación, entre otros. Las variables mencionadas cobran importancia ya que permiten estimar la energía generada por un SFCR a lo largo del tiempo, de manera que se encuentran relacionadas con la factibilidad de implementación de un proyecto de SFCR. Modelar 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 eficiencia de conversión tiene relación con el voltaje de entrada de CC, comportamiento inherente del inversor y la potencia de entrada (King et al., 2007). El objetivo de este trabajo es modelar con precisión la relación entre la potencia de CA y la potencia de CC para los inversores de un SFCR.

Desde un punto de vista más general, los inversores pueden modelarse teniendo en cuenta la eficiencia de seguimiento del punto de máxima potencia ( $\eta_{MPPT}$ ) y la eficiencia de conversión ( $\eta_{CON}$ ). Si se realiza un estudio en base a la potencia de entrada ( $P_{DC}$ ) y salida ( $P_{AC}$ ) del inversor, se puede realizar un análisis de la  $\eta_{CON}$ . Como  $\eta_{MPPT}$  suele ser elevada, por lo tanto en este trabajo no se tendrá en cuenta, siendo la  $\eta_{CON}$  más significativa para su análisis. La  $\eta_{CON}$  tiene dependencia con la tensión de entrada ( $V_{DC}$ ) y la potencia de entrada del inversor y, en menor medida, con la temperatura del inversor (King et al., 2007). De acuerdo a lo expuesto, en este trabajo se aborda un modelo de inversor presentado en el año 2007 por Sandia National Laboratories (King et al., 2007), teniendo en cuenta solo las magnitudes relacionadas a la  $\eta_{CON}$ , en base a datos obtenidos de diferentes ensayos. Esta función permitirá modelar el comportamiento de un inversor de manera más precisa y real, como también calcular su potencia de salida en base a la tensión y potencia de entrada.

## INVERSORES DENTRO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Los inversores utilizados en los sistemas de conexión a la red son el puente para la inyección de energía a la red proveniente de los módulos fotovoltaicos. En la actualidad diferentes empresas desarrollan estos dispositivos y se observa que su potencia nominal puede variar desde unos cientos de vatios (micro inversores) hasta inversores para usinas eléctricas de más de 1 MW (inversores centrales). 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 ( $I_{AC}$ ). Estas funciones son importantes y se encuentran relacionadas con la pérdida de energía que provienen de los módulos, ya que el inversor puede trabajar en un punto de la curva  $P$ - $V$  diferente al de máxima potencia y su  $\eta_{CON}$  no es ideal, dependiendo esta última de la  $V_{DC}$  y la  $P_{DC}$  como se muestra en la figura 1.

La norma EN50530 tiene en cuenta estas características en los inversores y para cada una de las funciones mencionadas describe una eficiencia, descritas en las ecuaciones 1 y 2.

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^{T_M} p_{DC}(t) dt}{\int_0^{T_M} P_{MMP}(t) dt} \quad (1)$$

$$\eta_{CON} = \frac{\int_0^{T_M} p_{AC}(t) dt}{\int_0^{T_M} p_{DC}(t) dt} \quad (2)$$

Donde  $p_{DC}(t)$  es el valor instantáneo de potencia en la entrada del inversor,  $p_{MMP}(t)$  es el valor instantáneo de potencia máxima del generador fotovoltaico y  $p_{AC}$  la potencia instantánea a la salida del inversor.

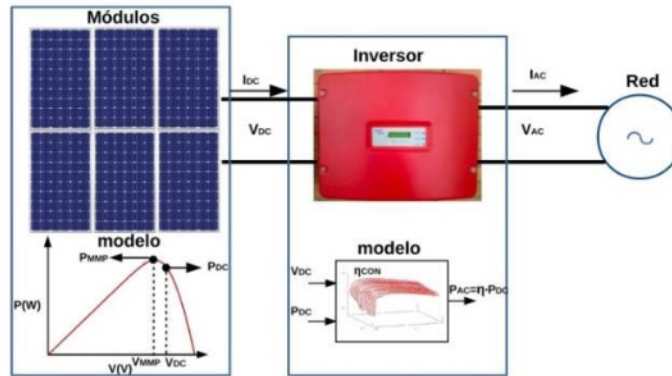


Figura 1: Esquema de un SFCR.

## MODELO DE INVERSOR

Existen diferentes expresiones para modelar el comportamiento de un inversor para un SFCR, entre las más utilizadas se encuentra la expresión presentada por Jantsch (Jantsch et al., 1992), la misma relaciona la  $\eta_{CON}$  con la  $P_{NOM}$  y la  $P_{CA}$ , como se observa en la ecuación (3).

$$\eta_{CON} = \frac{P_{CA}}{P_{DC}} = \frac{\frac{P_{CA}}{P_{NOM}}}{\frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + K_0 + K_1 \frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + K_2 \left(\frac{P_{CA}}{P_{NOM}}\right)^2} \quad (3)$$

Con esta expresión se obtiene una simulación detallada de inversores a nivel de hardware o sistema de control, para la predicción del comportamiento a largo plazo, por ejemplo la estimación del rendimiento anual, un modelo simple de  $\eta_{CON}$  en función de la potencia de entrada o salida. En esta última se observan tres parámetros que caracterizan la curva de un inversor,  $K_0$ ,  $K_1$  y  $K_2$ , las cuales se relacionan con características físicas del inversor. El consumo del inversor debido a los dispositivos de control, regulación, medidores e indicadores que operan permanentemente están relacionado con  $K_0$ . Por otro lado, los parámetros  $K_1$  y  $K_2$  están relacionados con las pérdidas de potencia debido al punto de operación, como ser: las pérdidas por los diodos y dispositivos de conmutación, resistencias, inductancias y cables.

Es importante mencionar que los parámetros de las curvas se obtienen para una  $V_{DC}$  definida, esto significa que la curva de eficiencia para otras tensiones de entrada puede ser diferente. Como la tensión de entrada del inversor generalmente es la tensión de máxima potencia del conjunto de módulos, la cual varía con la irradiancia y la temperatura, es necesario tener una gran cantidad de curvas para determinar de forma precisa la  $P_{AC}$  en función de la  $\eta_{CON}$ . Debido a esto, en este trabajo se plantea un modelo que determina  $P_{AC}$  en función de  $P_{DC}$ ,  $V_{DC}$  y parámetros obtenidos de la hoja de datos del inversor.

Si se analiza las medidas de  $P_{DC}$  y  $P_{AC}$ , como se observa en la Figura 2, se puede analizar el comportamiento del inversor en todo el rango de potencia de entrada, para una  $V_{DC}$  definida.

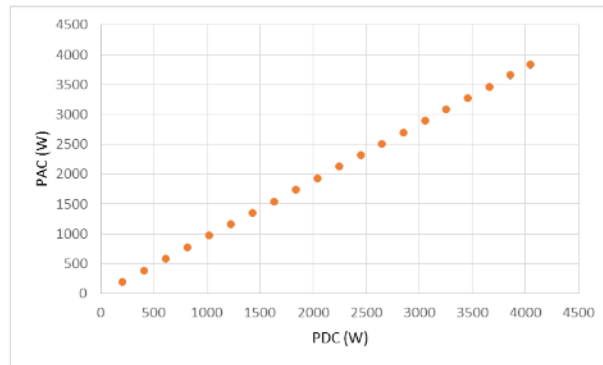


Figura 2: Resultados obtenidos del ensayo de un inversor SMA3800, manteniendo  $V_{DC}=215V$ .

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 2 no se aprecia este efecto, en la gráfica de la eficiencia del inversor ( $\eta_{CON}$ ) se aprecia de forma notoria esta no linealidad existente entre la potencia de CA y CC, como se observa en la Figura 3.

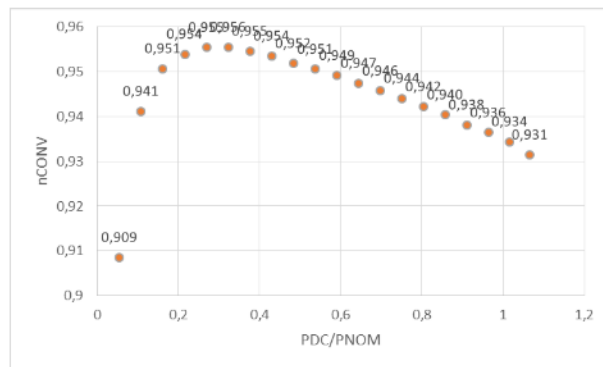


Figura 3: Eficiencia de conversión para un inversor SMA3800, manteniendo  $V_{DC}=215V$ .

La ecuación (4) define el modelo utilizado para relacionar la  $P_{AC}$  con la  $P_{DC}$  y la tensión de CC, que se utilizaron como variables independientes. Los parámetros con el subíndice “o” son valores que definen una condición de operación de referencia.

$$P_{CA} = \left( \frac{P_{NOM}}{(P_{dco} - P_{so})} - C_o(P_{dco} - P_{so}) \right) (P_{DC} - P_{so}) + C_o(P_{DC} - P_{so})^2 \quad (4)$$

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  $C_o$  se encuentran en función de la tensión de entrada  $V_{DC}$  como indican las siguientes expresiones.

$$P_{dco} = P_{dco0}(1 + C_1(V_{DC} - V_{DCo})) \quad (5)$$

$$P_{so} = P_{so0}(1 + C_2(V_{DC} - V_{DCo})) \quad (6)$$

$$C_o = C_{o0}(1 + C_3(V_{DC} - V_{DCo})) \quad (7)$$

$V_{dco}$  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 ( $1/V$ ).

## MODELO SIMPLIFICADO Y MEDIDAS REALIZADAS

El modelo planteado en este trabajo no tiene en cuenta la  $\eta_{MPPT}$  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 algunos casos, prácticamente el 100% (King et al., 2007). Por otro lado, determinar la  $\eta_{MPPT}$  no es una tarea sencilla, ya que requiere de mediciones simultáneas de  $P_{DC}$  y el punto de máxima potencia del campo fotovoltaico, como indica la expresión (1). Si bien en los ensayos realizados se determinaron la  $\eta_{MPPT}$  y la  $\eta_{CONV}$  del inversor, solo se consideraron esta última. Esto se debe a que las mediciones que los usuarios por lo general realizan sobre los inversores permiten determinar la  $\eta_{CONV}$  y por lo tanto, su aplicación es más útil en esta última situación.

Para aplicar el modelo de inversor presentado por Sandia National Laboratories (King et al., 2007), es necesario tener información del inversor que se desea estudiar. Debido a esto, se implementaron diferentes ensayos para obtener curvas de eficiencia del inversor SMA 3800U. La caracterización del inversor se llevó a cabo en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL), utilizando un simulador de módulos fotovoltaicos y un analizador de energía.

## ENSAYOS DEL INVERSOR SMA 3800U

El simulador 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<sub>DC</sub> y 32 A de entrada, necesita del software SAScontrol para poder operar. En la Figura 4 se observan las fuentes, el inversor y el analizador de energía utilizados en los ensayos.



Figura 4: Simulador de módulos Fotovoltaicos, analizador de energía e inversor.

Mediante este *software* se puede conducir 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 Tabla 1.

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 característico en funcionamiento	7W

Tabla 1 – Especificaciones del inversor SMA 3800U.

Para este inversor se desarrollaron diferentes ensayos con diferentes cargas hasta su potencia nominal. Si bien el fabricante indica que el inversor puede trabajar entre 200 V-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  $\eta_{MPPT}$  y las curvas de  $\eta_{CON}$  para cada tensión de trabajo. Se obtuvieron alrededor de 20 curvas para cada eficiencia con 20 puntos cada una. En la Figura 5 y 6 se observa las curvas obtenidas.

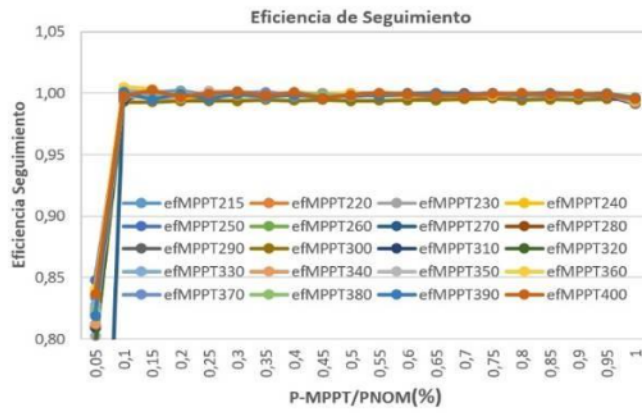


Figura 5: Curvas de Eficiencia de Seguimiento.

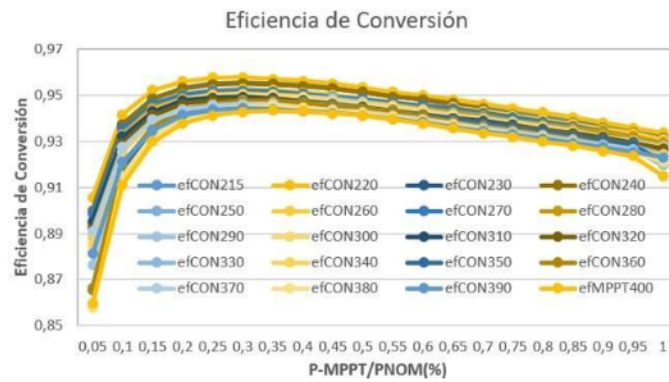


Figura 6: Curvas de Eficiencia de Conversión.

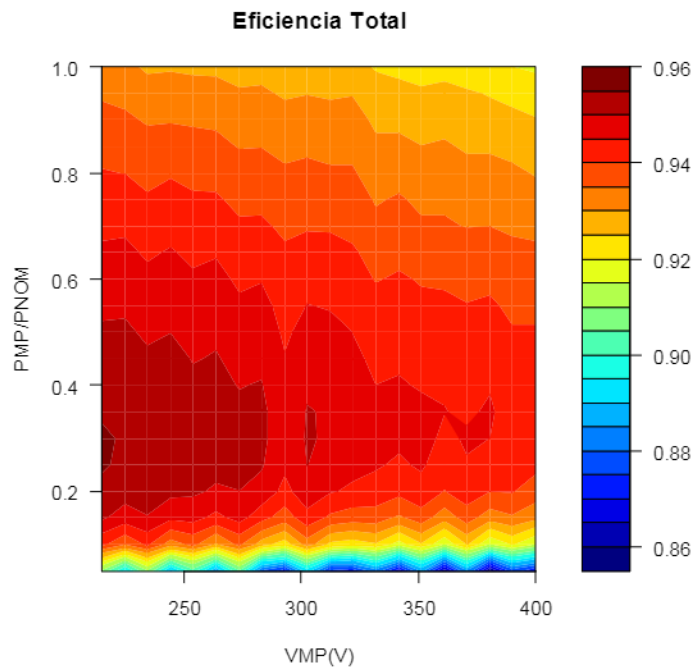


Figura 7: Curvas de nivel de Eficiencia de conversión.

En la Figura 5 se observa que a medida que la  $V_{DC}$  es más baja, la  $\eta_{CON}$  del inversor es más alta. Por otro lado, de acuerdo con la Figura 5 y 6, la  $\eta_{MPPT}$  y la  $\eta_{CON}$  dependen de la tensión y potencia de entrada del inversor, por lo que no es sencillo estudiar su comportamiento. Con la información obtenida de los ensayos se determinó en la Figura 7 las curvas de nivel de eficiencia y se observan de forma más clara la variación de la  $\eta_{CON}$  en función de la tensión de máxima potencia (V-MPPT) y el porcentaje de la potencia nominal (P-MPPT/PNOM).

En las gráficas se observa que la máxima  $\eta_{CON}$  se encuentra entre 0,95 a 0,96 y se consigue cuando el inversor trabaja en tensiones inferiores a los 300V y entre un 10 a un 60 % de la potencia nominal.

## DETERMINAR LOS PARÁMETROS DEL MODELO

Para validar el modelo de inversor se utilizaron 20 curvas de eficiencia de conversión (Figura 6). Con la información obtenida de los ensayos se determinaron los parámetros  $Pdco$ ,  $Pso$  y  $Co$ , estos tres parámetros se calcularon por cada curva de eficiencia de conversión. En el trabajo se desarrolló un programa basado en R, implementando algoritmos genéticos como herramienta de ajuste utilizando la librería "genalg". El algoritmo permite crear una población de  $Pdco$ ,  $Pso$  y  $Co$  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 descrito ( $P-AC\_salida$ ), 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  $Pdco$ ,  $Pso$  y  $Co$ . En la Figura 8 se observa como 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.

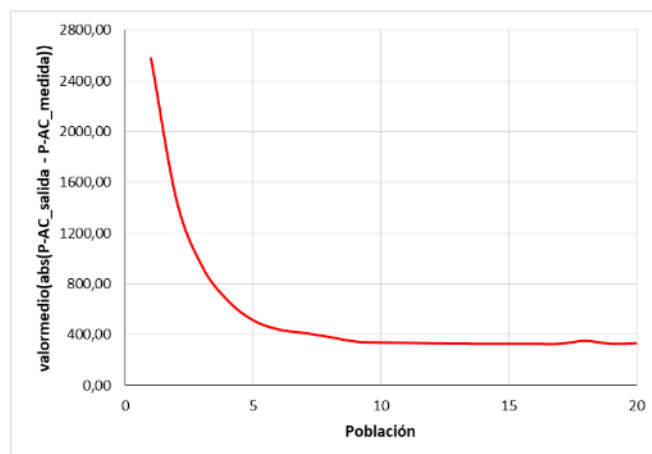


Figura 8: Valor medio del valor absoluto entre la resta de  $P-AC\_salida$  y  $P-AC\_medida$  en función de la evolución de la población (curva para  $V_{DC}=280V$ ).

Los entornos donde se generan la población para cada parámetro estudiado, se definen en base a la hoja de datos del inversor. Para  $Pdco$  se tuvo en cuenta el dato de la potencia máxima de entrada, 4040W como indica la tabla 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  $Pso$ , el entorno de búsqueda se realizó ente 0W a 12W, teniendo en cuenta que el fabricante indica valores alrededor de 7W, como indica la tabla 1. Debido a la linealidad entre  $P_{AC}$  y  $P_{DC}$ , los mejores ajustes para  $Co$  se obtuvieron para un entorno definido entre 0 y 1.

El conjunto de valores de  $Pdco$ ,  $Pso$  y  $Co$  obtenidos de las 20 curvas de eficiencia de conversión, nos permite determinar los coeficientes  $C1$ ,  $C2$  y  $C3$ , realizando un ajuste utilizando las expresiones (5), (6) y (7). En las Figuras 9 y 10 se observa los datos obtenidos y la curva de ajuste de  $Pdco$  y  $Pso$ .



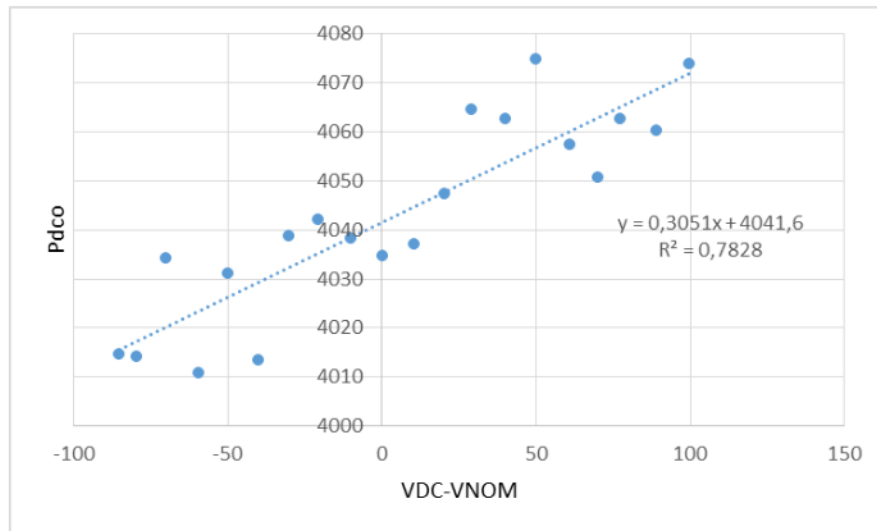


Figura 9: Ajuste para determinar la función  $P_{dc0}$ .

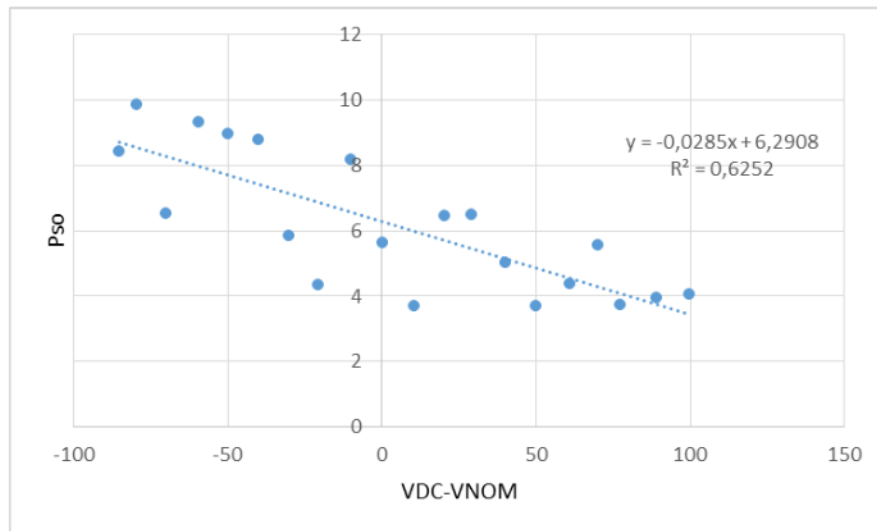


Figura 10: Ajuste para determinar la función  $P_{so}$ .

## VALIDACIÓN DEL MODELO

Para evaluar el modelo presentado por Sandia National Laboratories, se realizaron ensayos simulando mediante la fuente Regatron, la variación de la curva  $I-V$  de un conjunto de módulos fotovoltaicos conectados al inversor SMA 3800U. El ensayo consistió en reproducir la variación de las curvas  $I-V$  a lo largo de varias horas, en función de datos de irradiancia y temperatura de módulo medidos en LABSOL. Estas magnitudes muestreadas cada 1 segundo permiten variar la potencia en la entrada del inversor y medir la potencia en la salida ( $P-AC_{medida}$ ). Esta se compara con la potencia de salida estimada por el modelo en estudio ( $P-AC_{estimada}$ ) calculada a partir de la expresión (4). En la Figura 11 se observa la variación de la  $P-AC_{medida}$  y la  $P-AC_{estimada}$ .

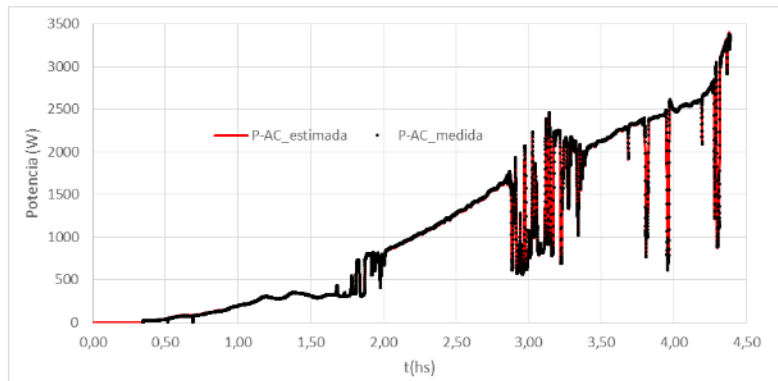


Figura 11: Ensayos durante 4 horas 30 minutos, variando la curva I-V en la entrada del inversor.

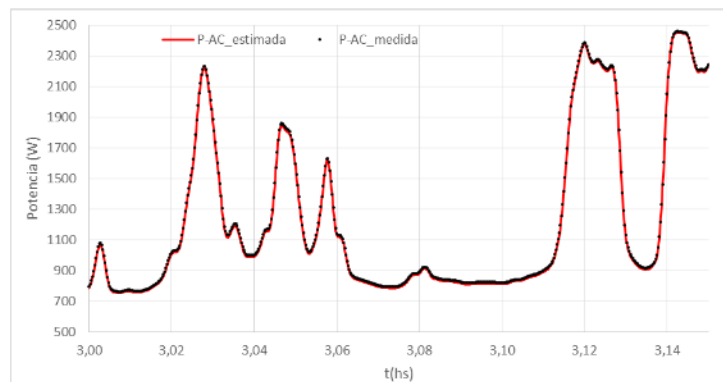


Figura 12: Comportamiento de los ensayos durante 9 minutos.

La  $P_{AC\_estimada}$  se calcula utilizando la expresión (4), ingresando la tensión de entrada del inversor  $V_{DC}$ , la cual es medida por el analizador de energía. En la Figura 12 se amplía la respuesta durante 9 minutos y se observa que las potencias estimadas tienen una buena correlación con la potencia medida, esto significa que el modelo utilizado es adecuado para determinar  $P_{AC}$ , a pesar de las grandes variaciones de irradiancia. Este análisis se refuerza al calcular el NRMSE%, el cual tiene en cuenta los valores medidos y estimados. Para el ensayo realizado se determinó un valor 0,92%.

## CONCLUSIÓN

El objetivo del trabajo fue implementar un modelo de inversor para SFCR, presentado en el año 2007 por Sandia National Laboratories. En el trabajo se realizaron diferentes ensayos a un inversor SMA 3800U, del cual se obtuvieron veinte curvas de eficiencia de conversión para desarrollar el modelo. Para cada una de estas curvas se determinaron los parámetros  $P_{dco}$ ,  $P_{so}$  y  $C_o$ , utilizando como herramienta de ajuste un programa basado en R que implementa librerías de algoritmos genéticos. La metodología implementada es uno de los aportes más significativo del trabajo, ya que se determinaron los parámetros  $P_{dco}$ ,  $P_{so}$  y  $C_o$ , generando poblaciones en entornos definidos en base a la información técnica del inversor. Con esta información se realizó un segundo ajuste, los parámetros  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ , los cuales permiten al modelo dar una respuesta en función de la tensión de entrada del inversor. De acuerdo al ensayo que se observa en la Figuras 11 y 12, se aprecia que el modelo entrega resultados precisos de la  $P_{AC}$ . En cuanto a la linealidad entre  $P_{so}$  y  $P_{dco}$  respecto a la tensión de entrada, podría mejorarse si se ajustan los entornos de búsqueda de los parámetros. Por otro lado, con menos curvas de eficiencia de conversión, se pueden encontrar resultados similares, como se propuso en el trabajo donde se presentó el modelo, que de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, permite obtener valores de  $P_{AC}$  precisos y confiables para analizar los SFCR.

## REFERENCIAS

- Del Brío B. M., Sanz Molina A., 1997. *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*, primera edición, Ra-Ma, Madrid, España.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, second ed. John Wiley & Sons Inc., New York.
- De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A., 2006. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy* 80 (2006) 78–88.
- 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, Suiza; p. 1589–93.
- 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.
- Mikati M., Santos M., Armenta C., 2012. Modelado y Simulación de un Sistema conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 9, 267-281.
- Trejos A., Gonzalez D., Ramos-Paja C., 2012. Modeling of Step-up Grid-Connected Photovoltaic Systems for Control Purposes. *Energies* 5, 1900-1926.
- 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.

## INVERTER MODELING FOR GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

**ABSTRACT:** The objective of this work is to model the response of an inverter for photovoltaic systems connected to the grid, relating the output power with the voltage and power of the set of photovoltaic modules. In the work, real measurements of an SMA 3800U inverter were used to validate an inverter model presented in 2007 by Sandia National Laboratories (King et al., 2007). For this study, tests were carried out through which twenty conversion efficiency curves were obtained, corresponding to twenty different input voltages, which are used to determine the parameters of the inverter model. The tests were carried out at LABSOL (Solar Energy Laboratory), at the Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil (UFRGS). The implemented model is characterized by linking parameters found in the data sheets of the inverter manufacturers, together with the input power and voltage. In the work, tests were carried out using a programmable source that simulates the variation of the I-V curves at the input of the inverter throughout a day, to study and validate the proposed model.

**Keywords:** Solar Energy, Photovoltaic, Inverters, Irradiance.