

ANÁLISIS DE DOS MODELOS MATEMÁTICOS DE INVERSORES PARA EL ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CONVERSIÓN CON RESPECTO A LA TENSION DE ENTRADA

Roberto Federico Farfán – farfan.roberto.f@gmail.com
Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería, INENCO.
César Wilhelm Massen Prieb – cprieb@ufrgs.br
Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LABSOL

Resumen. El objetivo de este trabajo es comparar dos modelos matemáticos de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados a la red, evaluando sus respuestas de acuerdo a la potencia y la energía de salida del inversor bajo diferentes condiciones de carga. El primer modelo contempla solo una curva de eficiencia para el cálculo de la potencia de salida del inversor, mientras que el segundo modelo utiliza veinte curvas de eficiencia correspondientes a veinte tensiones diferentes de entrada para el mismo cálculo. La diferencia más importante entre los modelos, es que el segundo tiene en cuenta la variación de la eficiencia en función de la tensión de entrada del inversor, mientras que en el primero se desprecia estos cambios. En el trabajo se realizaron diferentes ensayos para obtener las curvas de eficiencia de un inversor SMA 3800U, para el cual se desarrollaron los dos modelos para su correspondiente estudio. Con la información de los ensayos se buscó desarrollar la función eficiencia con dependencia de la tensión y la potencia de entrada, utilizando un sistema de aprendizaje supervisado basado en Lógica Difusa. En el trabajo se realizan ensayos diarios del inversor y simulaciones anuales de una instalación fotovoltaica para evaluar y comparar los modelos. El objetivo de esta comparación es analizar la importancia de la variación de la eficiencia con respecto a la tensión de entrada en los modelos de inversor planteados.

Palabras-clave: Energía Solar, Fotovoltaico, Inversores.

1. 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 modulo FV. 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. 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, como la irradiancia y la temperatura ambiente. En un SFCR los inversores pueden trabajar con diferentes configuraciones, entre las que podemos nombrar: inversor central, inversor *string*, módulo AC (inversores integrados al módulos) o inversor *multi-string*. 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 mejoro 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. Desde un punto de vista más general, los inversores pueden modelarse teniendo en cuenta la eficiencia de seguimiento del punto de máxima potencia (η_{MPPT}) y la eficiencia de conversión (η_{CON}). La η_{MPPT} suele ser elevada, mientras que la η_{CON} es más significativa para su análisis. Si se tiene en cuenta solamente la potencia de entrada (P_{DC}) y salida (P_{AC}) del inversor, se puede realizar un análisis de la η_{CON} . La η_{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. El modelo de un inversor puede desarrollarse a partir de una curva de η_{CON} , determinada para una V_{DC} fija. Por medio de los parámetros que caracterizan esta curva, se puede determinar P_{AC} . Sin embargo, la η_{CON} cambia a medida que varía la V_{DC} , debido a esta característica, el modelado de un inversor real es más complejo. De acuerdo a lo expuesto, en este trabajo se aborda el problema evaluando la potencia de salida y la energía estimada por medio de dos modelos matemáticos de inversor. El primero realiza las estimaciones por medio de una curva de η_{CON} y el segundo contempla la variación de la η_{CON} con

respecto a la V_{DC} . El segundo modelo se desarrolla en base a veinte curvas de η_{CON} y se utiliza un sistema basado en lógica difusa para desarrollar una aproximación de la función $\eta_{CON}(V_{DC}, P_{DC})$. En el trabajo se realizan ensayos y simulaciones para comparar el comportamiento de ambos modelos y analizar la importancia del cambio de la η_{CON} con respecto a la V_{DC} .

2. 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 FVs. En la actualidad diferentes empresas desarrollan estos dispositivos y se observa que su potencia nominal puede variar desde unos cientos de vatios (microinversores) 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 η_{CON} no es ideal, dependiendo esta última de la V_{DC} y la P_{DC} como se muestra en la Fig. 1.

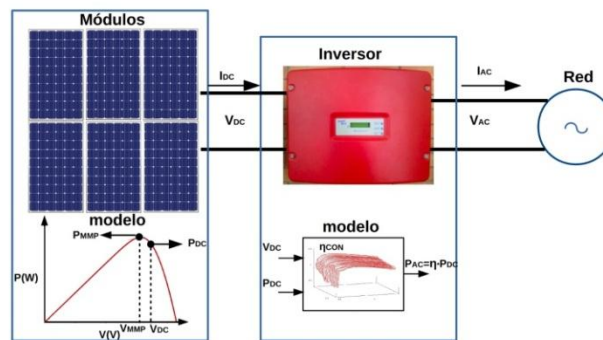


Figura 1- Esquema de un SFCR.

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

De las eficiencias mencionadas, en este trabajo se consideran solo la η_{CON} para los modelos de inversores, considerando que la eficiencia de η_{MPPT} es ideal. Por medio de la η_{CON} se puede determinar la P_{AC} y por lo tanto la energía inyectada a la red, como se observa en la Fig. 1. Estas magnitudes son las utilizadas para comparar los modelos de inversores que se describen en el trabajo.

2.1 Modelo de Módulo Fotovoltaico

El módulo FV constituye la principal fuente de energía de una instalación FV y es el resultado de asociar un conjunto de celdas en serie y paralelo. En la Fig. 2 se observa el modelo que se utiliza para representar un módulo FV en condiciones de iluminación. El mismo también puede utilizarse para representar una celda fotovoltaica o un conjunto de paneles (Duffie and Beckman, 1991).

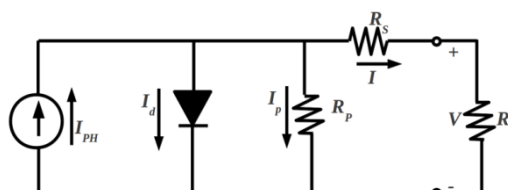


Figura 2 - Modelo eléctrico de modulo FV.

En el gráfico se identifica la diferencia de potencial entre los bornes del panel con la variable V y la corriente que entrega el mismo con la variable I . Las magnitudes involucradas en la Fig. 2 se relacionan por medio de la Eq. 3.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + IR_S}{N_{sm} V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (3)$$

En donde I_{ph} es la corriente fotogenerada, I_0 la corriente de saturación inversa, V_t el voltaje térmico, N_{sm} el número de celdas fotovoltaicas conectadas en serie en el panel, R_S la resistencia serie y R_p la resistencia paralelo.

La determinación de la tensión y la corriente por medio de la Eq. 3 es importante, ya que esta información permite el cálculo de la potencia generada por los módulos FV. La Eq. 3 suele resolverse mediante algoritmos iterativos, los cuales determinan los diferentes valores de tensión y corriente que forman la curva $I-V$ del conjunto. Para cada valor de irradiancia y temperatura de celda se encuentra una curva $I-V$ definida. Emplear dicha ecuación para determinar la potencia de los paneles FV es una tarea laboriosa, ya que deben conocerse los valores de los diferentes parámetros descriptos, y trabajar con las expresiones que permiten determinar la variación de cada uno respecto a la irradiancia y temperatura. Debido a esto, en este trabajo se decidió trabajar con el modelo King (King et al., 2004), el cual permite describir el comportamiento de módulos de diferentes tecnologías en función de la irradiancia, la temperatura de celda, entre otros. En la Fig. 3 se observa la curva $I-V$ de un módulo FV. En esta se resaltan los cinco puntos característicos que el modelo de King utiliza para su descripción, los cuales se encuentran en función de la irradiancia y temperatura de celda, como indican las Eqs. 4 a 12.

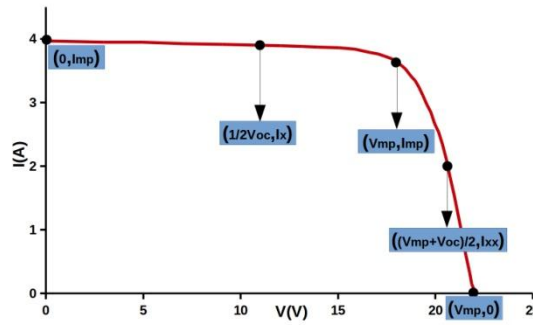


Figura 3 - Curva $I-V$ de un módulo FV con los puntos característicos del modelo de King.

$$I_{sc} = I_{scn} \left[\frac{M}{M_n} \right] \left[1 + \alpha_{isc} (T - T_n) \right] \frac{G}{G_n} \quad (4)$$

$$V_{mp} = V_{mpn} + c_2 N_{sm} \delta(T) \ln(E_e) + c_3 N_{sm} [\delta(T) \ln(E_e)]^2 \quad (5)$$

$$I_{mp} = I_{mpn} [c_0 E_e + c_1 E_e^2] [1 + \alpha_{ipm} (T - T_n)] \quad (6)$$

$$\delta(T) = \frac{n_p k T}{q} \quad (7)$$

$$E_e = \frac{I_{ph}}{I_{phn} [1 + \alpha_{isc} (T - T_n)]} \quad (8)$$

$$I_x = I_{xn} [c_4 E_e + c_5 E_e^2] \left[1 + \left(\frac{\alpha_{ics} + \alpha_{ipm}}{2} \right) (T - T_n) \right] \quad (9)$$

$$V_{OC} = V_{OCn} + N_{sn} \delta(T) \ln(E_e) + \beta_{voc} E_e [T - T_n] \quad (10)$$

$$I_x = I_{xnn} [c_6 E_e + c_7 E_e^2] [1 + \alpha_{ipm} (T - T_n)] \quad (11)$$

$$P_{mp} = V_{mp} I_{mp} \quad (12)$$

Las expresiones describen los valores más importantes de la curva $I-V$, la tensión de circuito abierto (V_{OC}), la corriente de corto circuito (I_{SC}), la tensión de máxima potencia (V_{mp}) y la corriente de máxima potencia (I_{mp}). A diferencia de los métodos más tradicionales, el modelo de King's utiliza dos puntos más de la curva $I-V$ (I_x e I_{xx}) los cuales permitirían una descripción más fiel si se desea obtener una curva $I-V$. Las expresiones se encuentran en función de la información que el fabricante de módulos otorga, V_{OCn} , I_{SCn} , I_{mpn} y V_{mpn} , estos son: la tensión de circuito abierto, la corriente de corto circuito, la tensión de máxima potencia y la corriente de máxima potencia bajo condición estándar ($G_n = 1000 \text{ W/m}^2$, a una temperatura de celda $T_n = 25 \text{ °C}$ y una distribución espectral AM 1.5). En las expresiones se observa N_{sn} , este es el número de celdas FVs en serie del módulo. Con el producto entre V_{mp} e I_{mp} puede determinarse el punto de máxima potencia de la curva $I-V$ (P_{mp}). La irradiancia que llega a la celda está representada por G , la

temperatura de celda por T , mientras que α_{isc} , β_{voc} , α_{imp} y β_{vmp} son los coeficientes de temperaturas de la corriente de corto circuito, tensión de circuito abierto, corriente de máxima potencia y la tensión de máxima potencia respectivamente. El NIST (National Institute of Standards and Technology) determino los valores de C_0 , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 y C_7 para diferentes tecnologías de módulos FV, las cuales se utilizan en este trabajo (De Soto et al. 2006).

La temperatura de celda no es una variable que generalmente se determina de una medida directa, es por ello que se recurre a diferentes métodos para determinarla. Una medida indirecta de la temperatura de celda puede realizarse por medio de un balance térmico, un cálculo que necesita el planteo de un sistemas de ecuaciones con un gran número de variables (Tina y Scrofaní, 2008; Sopian et al., 1996). Una solución más práctica con buena aproximación se observa en la Eq. 13 (Duffie and Beckman, 1991).

$$T = Ta + \frac{G\tau\alpha}{U_L} \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau\alpha}\right) \quad (13)$$

Donde Ta es la temperatura ambiente, τ es la transmitancia de la cobertura sobre la celda, α es la fracción de radiación absorbida por la cubierta, η_c es la eficiencia de la celda y U_L es un coeficiente de pérdida por convección y radiación.

2.2 Modelo de inversor

En este trabajo se presta atención solamente a la η_{CON} . Existen diferentes expresiones para modelar esta eficiencia, una de las expresiones utilizadas es la expresión presentada por Jantsch (Jantsch et al., 1992). En esta se relaciona la eficiencia con la P_{NOM} y la P_{AC} , como se observa en la Eq. 14.

$$\eta_{CON} = \frac{P_{CA}}{P_{DC}} = \frac{\frac{P_{CA}}{P_{NOM}}}{\frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + K_0 + K_1 \frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + K_2 \left(\frac{P_{CA}}{P_{NOM}}\right)^2} \quad (14)$$

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 es idealmente V_{mp} , las cuales varían con la irradiancia y la temperatura de los módulos, es necesario tener una gran cantidad de curvas para determinar de forma precisa la η_{CON} y por lo tanto P_{AC} en función de los parámetros eléctricos de los módulos.

3. FLC (FUZZY LOGIC CONTROLLERS)

Los FLC necesitan ordenar su estructura lógica en el Núcleo de Inferencia Difusa, compuesto por tres bloques. El bloque denominado Fuzzyficador, encargado de transformar la información que ingresa del sistema que se desea controlar en un valor difuso. El bloque Evaluación de Reglas, encargado de relacionar los conjuntos difuso de entrada con un conjunto difuso de salida. El bloque Defuzzyficador, encargado de transformar la salida difusa en un valor no difuso. En la Fig. 4 se observa un esquema que describe la estructura de un sistema FLC.

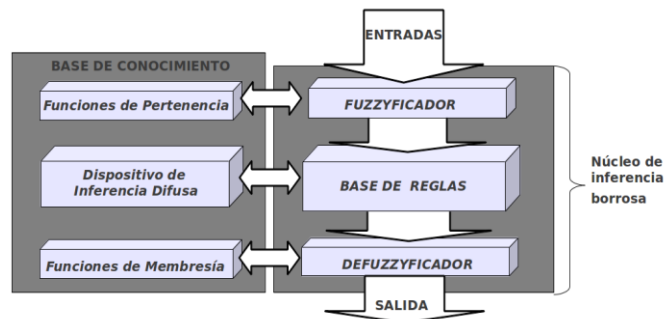


Figura 4 - Esquema de un sistema FLC.

Los FLC pueden incorporar herramientas que permiten modificar su base de conocimiento, con la intención de optimizar su funcionamiento. Estas herramientas se denominan algoritmos de aprendizaje y su idea general es la de realizar un procesamiento para aprender o extraer información de un conjunto de patrones. Las redes neuronales artificiales y los FLC son aproximadores funcionales genéricos, desde el punto de vista matemático, ambos pueden realizar un mapeo no-lineal entre entradas y salidas (Del Brío y Sanz, 1997). Los FLC pueden aproximar cualquier

función con un error menor al fijado en el aprendizaje (Del Brío y Sanz, 1997). Los FLC se componen de funciones internas que pueden modificarse por medio del aprendizaje a partir de información externa, perteneciente al sistema que se desea controlar o modelar. En este trabajo se busca utilizar un FLC para crear una función que relacione la tensión y potencia de entrada de un inversor con su eficiencia de conversión. Esta función ajustada con información de veinte curvas de eficiencia permitirá calcular la potencia de salida de un inversor.

3.1 Cálculo de la potencia de un inversor para una curva de eficiencia

Para el modelo de inversor de una curva el cálculo de la P_{AC} puede realizarse utilizando la Eq. 14. De esta última expresión se puede determinar un polinomio de la P_{AC} de un inversor la cual se describe en la Eq. 15.

$$\frac{P_{DC}}{P_{NOM}} = \frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + K_0 + K_1 \frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + K_2 \left(\frac{P_{CA}}{P_{NOM}} \right)^2 \quad (15)$$

En esta última expresión se observa que la potencia de salida depende de variables conocidas como: la P_{NOM} , los parámetros que deben determinarse de las curvas de la η_{CON} del inversor (K_0 , K_1 y K_2) y la P_{DC} . La potencia de salida del inversor calculada en el polinomio ($P_{AC}(\eta_{CON}, P_{DC}, P_{NOM})$) no tiene en cuenta la variación de η_{CON} con respecto a V_{DC} si toman los parámetros K_0 , K_1 y K_2 constantes. Tampoco tiene en cuenta el rango de tensiones de entada permitidas en el inversor, este detalle se debe abordar a la hora de trabajar con el modelo final.

Si bien con el cálculo de $P_{AC}(\eta_{CON}, P_{DC}, P_{NOM})$ se determina de forma directa la potencia de salida del inversor, es necesario definir los diferentes estados en el cual se puede trabajar de acuerdo a la P_{DC} . Por lo general un inversor puede estar desconectado, conectado sin sobrecarga o en sobrecarga. Si el inversor no se conecta, suponiendo que la red tiene sus parámetros nominales normales, es porque la potencia generada por el conjunto de paneles es baja. Si la potencia generada por los módulos es alta, el inversor puede estar en sobrecarga. Bajo esta última condición, el inversor puede mantener la potencia de salida constante cambiando la tensión de máxima potencia a otra más alta en donde la potencia es más baja. Entre los estados descriptos se espera que el inversor trabaje la mayor cantidad de tiempo, en esta situación la P_{AC} depende de forma directa de la curva de eficiencia del inversor. Esta descripción se detalla en las Eq. (15), (16) y (17).

$$\begin{cases} P_{CA} = P_{NOM} & \text{si } P_{AC}(\eta_{CON}, P_{DC}, P_{NOM}) \geq P_{NOM} \\ P_{CA} = P_{AC}(\eta_{CON}, P_{DC}, P_{NOM}) & \text{si } P_{NOM} K_0 < P_{AC}(\eta_{CON}, P_{DC}, P_{NOM}) < P_{NOM} \\ P_{CA} = 0 & \text{si } P_{NOM} K_0 \geq P_{AC}(\eta_{CON}, P_{DC}, P_{NOM}) \end{cases} \quad (16)$$

$$\quad (17)$$

$$\quad (18)$$

La condición de la Eq. 16 indica que el inversor esta en sobrecarga, la condición de la Eq. 18 representa los momentos que el inversor no se conecta a la red y bajo la condición de la Eq. 17 se obtiene la variación de potencia del inversor en función de la potencia de entrada (P_{DC}) y la η_{CON} .

3.2 Cálculo de la potencia de un inversor utilizando un FLC

El modelo implementando un FLC se plantea para el cálculo de la P_{AC} . Para ello se busca desarrollar una superficie que represente la eficiencia del inversor en función V_{DC} y P_{DC} . Este modelo otorga una buena aproximación al comportamiento real de un inversor, ya que una de las variables de entrada es V_{DC} y por lo tanto se puede definir en el modelo el rango de tensión de entrada en donde el inversor se conecta para inyectar energía a la red. Aquí puede observarse que el modelo necesita definir una tensión mínima (V_{MIN}) y una tensión máxima (V_{MAX}) de entrada de máxima potencia. Esto implica que si la tensión de entrada es menor a V_{MIN} , el inversor no se conecta. Por otro lado, si el inversor se conecta, la P_{AC} puede calcularse por medio del sistema FLC, salvo que la P_{DC} supere una potencia máxima de entrada (P_{DCmax}). En esta situación, la P_{AC} del inversor permanece constante e igual a la potencia nominal. Si la V_{DC} es mayor a la tensión V_{MAX} , situación que no debería presentarse con frecuencia y que depende del diseño original del SFCR, el cálculo de la potencia se realiza con el FLC utilizando la curva de eficiencia perteneciente a V_{MAX} . Las ecuaciones Eq. 19 a Eq. 23 describen el funcionamiento del modelo.

$$\begin{cases} V_{DC} < V_{MIN} & \text{entonces } P_{AC} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} V_{MIN} \leq V_{DC} \leq V_{MAX} & \text{y } P_{DC} < P_{DCmax} & \text{entonces } P_{AC} = FLC(V_{DC}, P_{DC}) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} V_{MIN} \leq V_{DC} \leq V_{MAX} & \text{y } P_{DC} \geq P_{DCmax} & \text{entonces } P_{AC} = P_{NOM} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} V_{DC} > V_{MAX} & \text{y } P_{DC} < P_{DCmax} & \text{entonces } V_{DC} = V_{MAX} & \text{y } P_{AC} = FLC(V_{DC}, P_{DC}) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} V > V_{MAX} & \text{y } P_{DC} \geq P_{DCmax} & \text{entonces } P_{AC} = P_{NOM} \end{cases} \quad (23)$$

4. DESARROLLO DE LOS DOS MODELOS DE INVERSORES

Para desarrollar un FLC es necesario tener información para realizar el ajuste. Es por ellos que se implementaron diferentes ensayos para obtener diferentes 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 simulador de módulos FVs y un analizador de energía. El simulador de módulos FVs 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 entrada, necesita del software SAScontrol para poder operar. Mediante este *software* se puede manipular la fuente programando los cargamentos del inversor o simular la variación de la curva *I-V* mediante datos de irradiancia y temperatura de módulo.

4.1 Ensayos y Aprendizaje

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

Para este inversor se desarrollaron diferentes ensayos con diferentes cargamentos 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 ensayo el inversor entre el rango de 215-400 V. Después de los ensayos, se realizó el procesamiento de la información, determinándose la curva de eficiencia para cada tensión de trabajo. Se obtuvieron alrededor de 20 curvas de eficiencia con 20 puntos cada una. En la Fig. 5 se observa las curvas de eficiencia obtenidas de los ensayos.

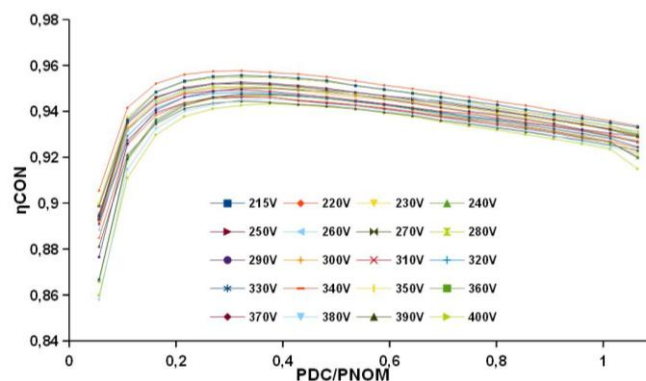


Figura 5 - Curvas de eficiencia obtenidas de los ensayos del inversor SM 3800U.

Para el modelo de inversor con una curva se decidió trabajar con la curva perteneciente a la tensión más baja. Esto tiene dos motivos, el primero es que es una curva que el fabricante ilustra en su catalogo y por otro lado, esta se relaciona con una tensión que se encuentra en el rango nominal de trabajo del inversor. En la Fig. 5 se observa que a medida que la V_{DC} es más baja, la eficiencia del inversor es más alta. Como la tensión más baja de conexión a la red de acuerdo a los ensayos realizados se produjo para una tensión de 215 V, el modelo con una curva tendrá los parámetros de esta última. Se realizó un ajuste para determinar de los parámetros K_0 , K_1 y K_2 para la curva de eficiencia perteneciente a la tensión de 215 V, en la Tab. 2 se muestran los resultados.

Tabla 2 – Parámetros obtenidos del ajuste para la curva de 215 V.

CARACTERÍSTICA	VALOR
K0	0,004928
K1	0,012572
K2	0,056913

Para el desarrollo del FLC se implemento el software Xfuzzy 3.0, el cual permite realizar ajustes de la base de conocimiento de un sistema FLC sin información, utilizando la herramienta aprendizaje supervisado. De los diferentes métodos que pueden implementarse para el aprendizaje, en el trabajo se utilizo Quasi-Newton. El FLC desarrollado tiene dos variables de entrada, la tensión en la entrada del inversor (V_{DC}) y la potencia en la entrada dividida con la potencia nominal (P_{DC}/P_{NOM}). La variable de salida del FLC es la η_{CON} y el objetivo del aprendizaje supervisado es

relacionar las variables de entrada y salida. Las variables de entradas se componen de trece funciones gaussianas cada una y el sistema se forma con 169 reglas. Los datos utilizados en el aprendizaje se observan en la Fig. 5. En la Fig. 6 se observa la ventana en donde Xfuzzy proyecta la variación del error a medida que se realiza el aprendizaje y las funciones de entrada y salida finales del sistema desarrollado.

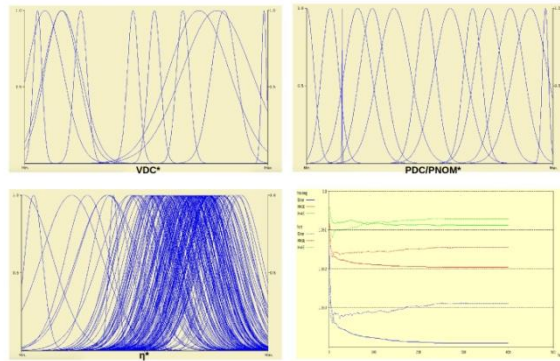


Figura 6 - Funciones de entrada y salida del FLC y variación del error en el aprendizaje.

Una vez realizado, el aprendizaje se puede obtener el plano de control final, que puede interpretarse como el plano que se observa en la Fig. 7, si se cambia el dominio de las funciones de entrada y salida.

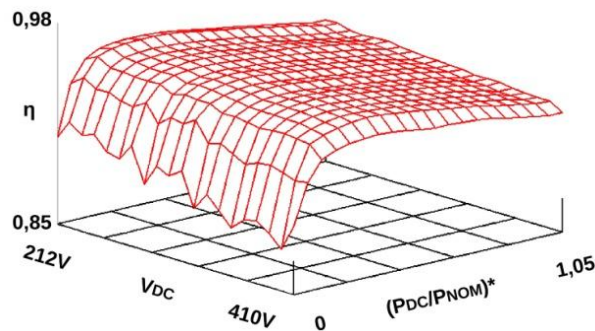


Figura 7 - Plano de eficiencia obtenido después del aprendizaje.

Se utilizaron los datos de dos curvas de η_{CON} medidas, las cuales no fueron usadas como información en el aprendizaje, para corroborar la estimación del FLC. Estas curvas se ensayaron para una V_{DC} de 285 V y 325 V. Las V_{DC} y P_{DC}/P_{NOM} pertenecientes a las curvas ensayadas se utilizaron como datos de entrada para el FLC y se comparó la η_{CON} medida (η_{CON_m}) con la η_{CON} estimada por el FLC (η_{CON_flc}). En la Fig. 8 se observa que las estimaciones de la η_{CON} son adecuadas hasta $P_{DC}/P_{NOM}=0,2$. Esto significa que para P_{DC} bajas, las estimaciones pueden tener un error mayor.

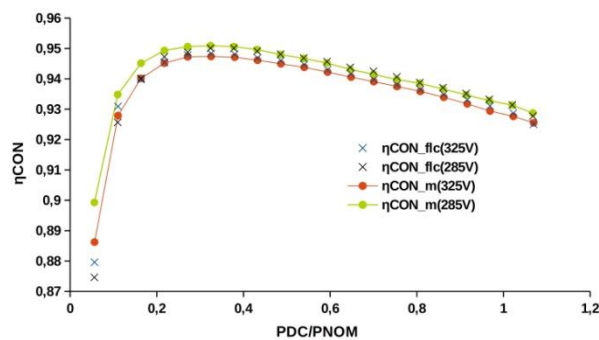


Figura 8- Estimación de la η_{CON} por medio del FLC.

5. SIMULACION DE UN DIA Y ANUAL

Para evaluar ambos modelos se ensayó el inversor simulando variaciones de curvas $I-V$ de módulos FVs generadas por el simulador de arreglos, se programaron dos días completos, con horas de datos de irradiancia y temperatura de modulo, con un periodo de muestreo de 1 seg. Una vez obtenidos los resultados reales, la medida de la potencia de salida del inversor en cada segundo de los dos días ensayados, se evaluaron ambos modelos comparando las potencias medidas con las potencias estimadas. Para comparar las estimaciones de P_{AC} de los modelos es necesario contar con herramientas que permitan evaluar los pronósticos realizados, como $NRMSE\%$ y el $NMBE\%$, los cuales se definen en las Eq. 24 y Eq. 25.

$$NRMSE\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{valorestimado} - \text{valormedido})^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{valormedido}} \times 100 \quad (24)$$

$$NMBE\% = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{valorestimado} - \text{valormedido})}{\sum_{i=1}^N \text{valormedido}} \times 100 \quad (25)$$

5.1 Simulación de dos días con el simulador de arreglos Regatron

En la Fig. 9 y 10 se observan los datos de entrada que utilizó el simulador de arreglos fotovoltaicos para la generación de curvas de las curvas $I-V$ en los días simulados.

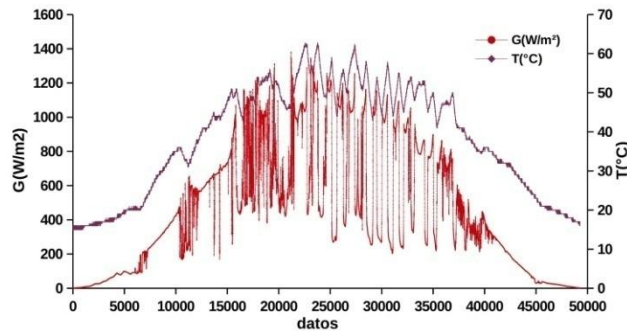


Figura 9 - Datos de entrada para Regatron (día 1).

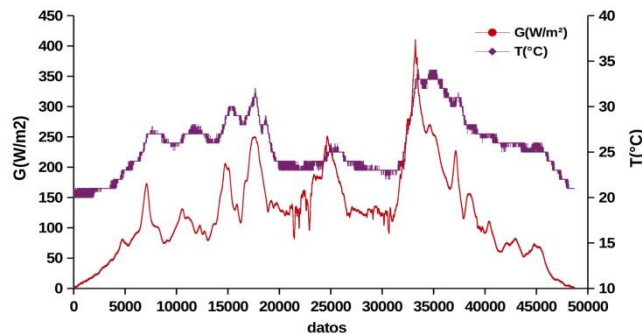


Figura 10 - Datos de entrada para Regatron (día 2).

En las Fig. 11 y Fig. 12 se observa la potencia activa medida en el ensayo (PAC_{med}), la potencia estimada por el FLC (PAC_{flc}) y la potencia estimada utilizando una curva del inversor (PAC_{215V}).

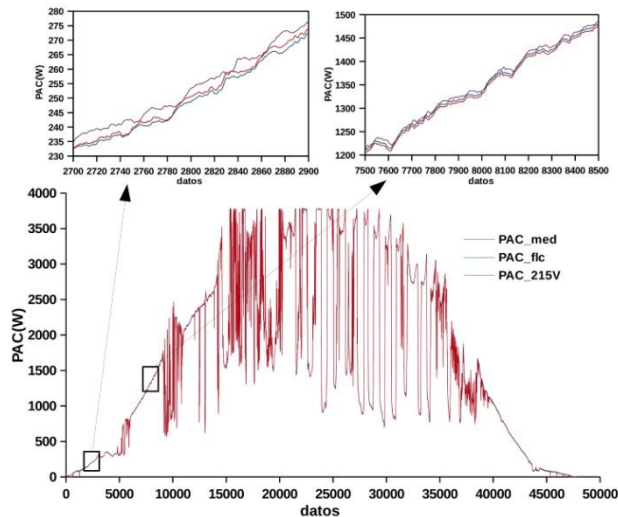


Figura 11 - Datos de entrada para Regatron (día 1).

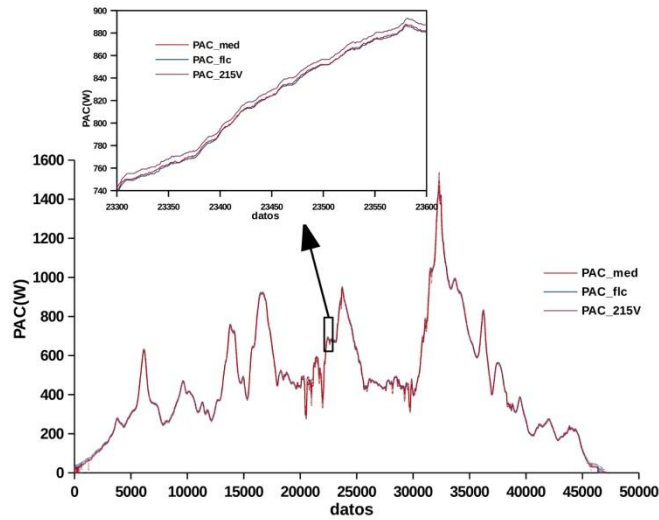


Figura 12 - Datos de entrada para Regatron (día 2).

En la Tab. 3 se observa los resultados obtenidos del *NRMSE%* y *NMBE%*, al comparar la potencia medida en el ensayo con los datos estimados por los modelos de inversor.

Tabla 3 – Resultados obtenidos para el día 1 y día 2.

CARACTERÍSTICA	Día 1	Día 2
<i>NRMSE%(FLC)</i>	0,467	0,951
<i>NMBE%(FLC)</i>	0,351	0,122
<i>NRMSE%(215V)</i>	12,711	0,789
<i>NMBE%(215V)</i>	0,583	0,546

En el día 1 se observa que los valores de *NRMSE%* y *NMBE%* para la estimación realizada por el FLC son más pequeños, lo que advierte un mejor ajuste de la P_{AC} . Por otro lado, en el día 2 se observa una leve mejora del modelo de una curva, sin embargo esta no es tan notoria como la que se observa en el día 1. Puede observarse que para el día 2 los modelos tienen errores similares, de manera que la estimación de la potencia se encuentra en el 1%, esto implica que el modelo del FLC se aproxima más a la realidad de la potencia inversor, si se tiene en cuenta los días ensayados. Por otro lado, también se calculo la energía inyectada a la red y se las comparo con la estimada por los modelos. Aquí se observa que la diferencia entre ambos modelos es alrededor de un 0,5%.

También se realizaron simulaciones anuales, con el objetivo de analizar la energía inyectada a la red. Para esta se utilizaron datos promedios horarios de irradiancia y temperatura de un año de la ciudad de Porto Alegre. Para la simulación de los módulos FVs se utilizo el modelo descrito, utilizando los parámetros de un modulo Isofoton I-100/24 de 100 W_p . El SFCR se proyecto con un factor de dimensionamiento de 0,84, esto implica cinco arreglos en paralelo de nueve módulos serie. Para esta simulación se calculo la energía inyectada a la red, calculada para cada mes por medio de los dos modelos de inversor. En la Fig. 13 se observa la energía generada mensualmente estimada por los dos modelos.

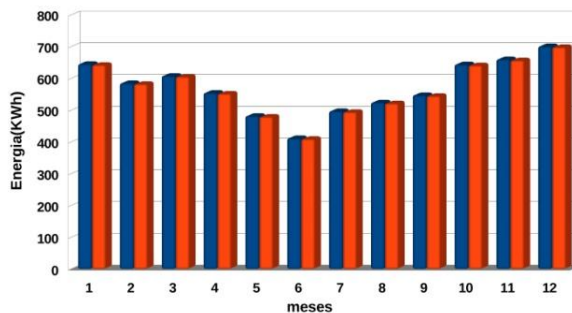


Figura 13 - Energía mensual generada por los modelos.

La diferencia entre la energía inyectada a la red estimada por ambos modelos es de 34 kWh, un 0,5%.

6. CONCLUSIÓN

El objetivo del trabajo fue comparar dos modelos matemáticos de inversores para analizar la importancia de la variación de la η_{CON} con respecto a la V_{DC} . En el trabajo se realizaron diferentes ensayos al inversor SMA 3800U, del cual se obtuvieron veinte curvas de eficiencia para desarrollar los modelos. Se utilizó un FLC para determinar por medio del aprendizaje la superficie de eficiencia $\eta_{CON}(V_{DC}, P_{DC})$. En el trabajo se comprobó que el FLC estima de forma correcta la η_{CON} , al comparar η_{CON_m} con la η_{CON_flc} de curvas ensayadas que no se utilizaron en el aprendizaje. También se observó que la estimación de la P_{AC} se realiza de forma correcta, al comparar las estimaciones de potencia en los días ensayados. En el día 2, se observa que el modelo tiene un error mayor debido a que en ese día se trabajó con P_{DC} bajas y es donde se observa que el modelo tiene un error de estación de η_{CON} más grande. Por otro lado, se observa que estas diferencias son bajas al analizar la energía inyectada a la red, observando en las simulaciones anuales que la diferencia aproximada entre las energías estimadas por ambos modelos es solo de 0,5%. Por lo tanto, puede concluirse que el modelo de inversor que contempla una curva de eficiencia es una aproximación adecuada para la estimación de la potencia y la energía inyectada a la red. Esto tiene como consecuencia que el efecto de variación de la eficiencia con respecto a la tensión de entrada en el inversor es despreciable. Esta característica probablemente puede repetirse en diferentes inversores, sin embargo esta afirmación no podría generalizarse.

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., Boyson, W.E., Kratochvil, J.A., 2004. Photovoltaic array performance model, Sandia Report No. SAND2004-3535 available from US Department of Commerce, National Technical Information Service, 5285 Port Royal Rd, Springfield, VA 22161.
- 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.
- Sopian K., Yigit K. S., Liu H. T., Kaka S., Veziroglu T. N., 1996. Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. Energy Convers. Mgmt Vol. 37, No. 11, pp. 1657-1670.
- Tina, G.M., Scrofani, S., 2008. Electrical and Thermal Model for PV Module Temperature Evaluation. The 14th IEEE Mediterranean, 585- 590.
- Trejos A., Gonzalez D., Ramos-Paja C., 2012. Modeling of Step-up Grid-Connected Photovoltaic Systems for Control Purposes. Energies 5, 1900-1926.

ANALYSIS OF TWO MATHEMATICAL MODELS OF INVERTERS FOR THE STUDY OF THE VARIATION OF THE CONVERSION EFFICIENCY WITH RESPECT TO THE VOLTAGE INPUT

Abstract. *The objective of this work is to compare two mathematical models of inverters for photovoltaic systems connected to the network, evaluating their responses according to the power and the output power of the inverter under different load conditions. The first model includes only one efficiency curve for calculating the inverter's output power, while the second model uses twenty efficiency curves corresponding to twenty different input voltages for the same calculation. The most important difference between the models is that the second one counts the variation of the efficiency as a function of the input voltage of the inverter, while in the first, these changes are disregarded. In the work, different tests were carried out to obtain the efficiency curves of an SMA 3800U inverter, for which the two models were developed for their corresponding study. With the information of the tests, we sought to develop the efficiency function with dependence on voltage and input power, using a supervised learning system based on Fuzzy Logic. In the work, daily inverter tests and annual simulations of a photovoltaic installation are carried out to evaluate and compare the models. The objective of this comparison is to analyze the importance of the variation of efficiency with respect to the input voltage in the proposed inverter models.*

Key words: Solar Energy, Photovoltaics, Inverters.