

Optimización de la Base de Conocimiento de un F.L.C. Implementando Técnicas de Aprendizaje Aplicado en el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia

Roberto Farfán¹, Carlos Cadena²

¹Facultad de Ingeniería, INENCO, UNSa-CONICET - Av. Bolivia 5150, (4400) Salta, Argentina, fede_farfan@hotmail.com

²Facultad de Ciencias Exactas INENCO, UNSa-CONICET Av. Bolivia 5150, (4400) Salta, Argentina

Resumen - La aplicación más extendida de la lógica difusa se encuentra en los sistemas expertos de control difuso basado en reglas conocidos como FLC (Fuzzy Logic Controllers). Estos sistemas se utilizan ampliamente en el control de diferentes sistemas debido a que un diseño adecuado permite velocidad, precisión y flexibilidad en el control. El siguiente trabajo muestra el desarrollo de la base de conocimiento de un sistema FLC implementado para controlar un convertidor DC-DC que permita la búsqueda del punto de máxima potencia de una instalación con paneles fotovoltaicos. Partiendo de un control FLC desarrollado previamente y expuesto en trabajos anteriores se muestra cómo la aplicación del método de aprendizaje supervisado permite optimizar la velocidad de convergencia del sistema al punto de máxima potencia.

Palabras clave: Fotovoltaico, Convertidor, Lógica Difusa

INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos se presentaron como una buena alternativa para la electrificación en lugares aislados y en la actualidad pueden utilizarse como centrales eléctricas conectadas a la red de energía convencional. El aprovechamiento óptimo de la energía que produce un conjunto de paneles fotovoltaicos depende de parámetros internos relacionados con sus características constructivas y calidad de las celdas fotovoltaicas que lo conforman así como también de parámetros externos como la Irradiancia y la temperatura. Por otro lado también es importante el punto de trabajo que impone una carga al conectarse ya que por lo general este punto no es el de potencia máxima. Es por ello que los sistemas desarrollados para el seguimiento del punto de máxima potencia tienen un papel trascendente en el aprovechamiento óptimo de la energía solar.

El desarrollo de un sistema de seguimiento necesita del diseño del software y del hardware del sistema. El hardware de un sistema de seguimiento consta de un convertidor DC-DC que funciona

a partir de un circuito electrónico conmutado de alta frecuencia. El trabajo más importante de estos convertidores es el de acondicionar la energía producida por los paneles fotovoltaicos llevando a que los mismos trabajen en un punto de la curva I-V en donde la potencia generada es máxima. Este punto se denomina Punto de Máxima Potencia y depende fundamentalmente de la Irradiancia y la temperatura del panel.

El software consiste en la lógica de control desarrollada a partir de algún método de búsqueda. En las referencias pueden encontrarse más de diez métodos diferentes, entre los que se puede nombrar; Perturbar y Observar (P&O) (Renaudineau et al., 2011.), Conductancia Incremental, algoritmos basados en Lógica Difusa (Messai et al., 2011; Shakil e Ismail, 2010), Redes Neuronales, entre otros (Chaouachi et al., 2010). La diferencia entre éstos se encuentra en la complejidad, en los sensores que se necesita, en la velocidad de convergencia, en el hardware, entre otros (Esram y Chapman, 2007). Los sistemas que implementan Lógica Difusa para su control generalmente requieren de un trabajo más

intenso debido a que su respuesta se encuentra en función de un conjunto de reglas que debe definirse. A pesar de ello un adecuado planteo y desarrollo pueden combinar velocidad de convergencia, precisión y flexibilidad en el control de búsqueda (Brío y Molina, 1997) como se demostró en diferentes trabajos desarrollados. Estas características pueden estar asociadas con un planteo heurístico sencillo de manera que esta combinación de factores potencia cada vez más su implementación en diferentes sistemas de control, reemplazando en algunas situaciones a los algoritmos convencionales.

MODELO DE PANEL FOTOVOLTAICO

Un panel fotovoltaico es el resultado de asociar un conjunto de celdas fotovoltaicas en serie y paralelo. En la Fig. 1 se observa el modelo que se utiliza en el trabajo para representar un panel fotovoltaico en condiciones de iluminación. También puede utilizarse para representar una celda fotovoltaica o un conjunto de paneles (Duffie and Beckman, 1991; Villalva et al., 2009). 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. 1 se relacionan por medio de la expresión 1 (Remus Teodorescu y Rodríguez, 2007; Villalva et al., 2009).

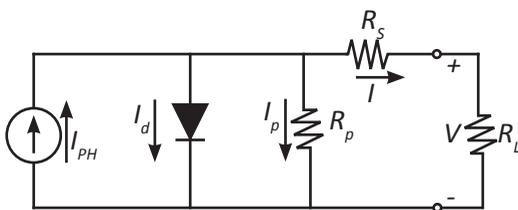


Figura 1 - Modelo de panel fotovoltaico

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_s V_t} \right) - 1 \right) - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p} \quad (1)$$

$$V_t = \frac{nKT}{e} \quad (2)$$

donde I_{ph} es la corriente fotogenerada, I_0 la corriente de saturación inversa, V_t el voltaje térmico dado por la expresión (2), n_s el número de celdas fotovoltaicas conectadas en serie en el panel, R_s la resistencia serie, R_p la resistencia paralelo, T la temperatura de celda, K la constante de Boltzmann, e la carga del electrón y n factor de idealidad del diodo.

La energía que un panel fotovoltaico puede entregar se encuentra en función de variables externas al panel como la irradiancia, temperatura y parámetros internos como su resistencia serie, resistencia paralelo, factor de idealidad del diodo, entre otros. La expresión 3 describe el comportamiento de la corriente fotogenerada (I_{ph}).

$$I_{ph} = (I_{phn} + \alpha_{I_{sc}} (T - T_n)) \frac{G}{G_n} \quad (3)$$

donde T_n es la temperatura de condición estándar (298°K), I_{phn} la corriente fotogenerada a 1000W/m² y a T_n , $\alpha_{I_{sc}}$ el coeficiente de corriente de cortocircuito temperatura (A/°K) y G_n la irradiancia con un valor de 1000 W/m².

La corriente de saturación inversa también puede modelarse definiéndose la misma en la expresión 4.

$$I_0 = I_{0n} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \exp \left(\frac{1}{k} \left(\frac{E_g(T_n)}{T_n} - \frac{E_g(T)}{T} \right) \right) \quad (4)$$

donde I_{0n} es la corriente de saturación inversa a 1000W/m² y a T_n y E_g la energía del gap del semiconductor. La energía del gap tiene dependencia con la temperatura de celda. La expresión 5 describe su variación, en donde E_{gref} es 1,121 eV.

$$\frac{E_g}{E_{gref}} = 1 - 0,0002677(T - T_n) \quad (5)$$

El voltaje térmico definido en la expresión 2 se encuentra relacionado con la temperatura de celda y su variación se puede asociar al voltaje térmico ob-

tenido de las condiciones ideales como se observa en la expresión 6.

$$\frac{V_t}{V_{t\ ref}} = \frac{T}{T_{ref}} \quad (6)$$

En el modelo de panel se observan dos resistencias, serie y paralelo. Si bien la variación de ambas resistencias se encuentra influenciada por la temperatura y la irradiancia, la resistencia serie se tomo constante ya que su variación no afecta de forma relevante la potencia máxima mientras que R_p varía como se observa en la expresión (7).

$$\frac{R_p}{R_{p\ ref}} = \frac{G_{ref}}{G} \quad (7)$$

Una solución práctica con buena aproximación para la determinación de la temperatura de celda se encuentra en la utilización de ecuaciones empíricas como la que se observa en la expresión 8 (Almonacid, 2009).

$$T_c = T_m + \frac{G}{G_n} \Delta T \quad (8)$$

En donde T_m indica la temperatura del panel en su cara posterior en grados centígrados y ΔT la temperatura entre el vidrio del panel y el Tedlar®. Generalmente para este último se utiliza 3°C.

Estas expresiones permiten modelar la respuesta de un conjunto de celdas fotovoltaicas bajo la influencia de un valor determinado de Irradiancia y temperatura. La respuesta del conjunto se caracteriza por su curva $I-V$ (corriente-tensión) o su curva $P-V$ (potencia-tensión). La Fig. 2 muestra la simulación de tres curvas $P-V$ de un panel fotovoltaico de 45Wp con temperatura de celda de 25°C y bajo la influencia de tres Irradiancias, 600W/m² (negro), 800W/m² (discontinuo) y 1000W/m² (puntos). En cada curva se marcó el punto de máxima potencia.

En las curvas $P-V$ puede apreciarse la variación de la potencia que puede entregar un panel ob-

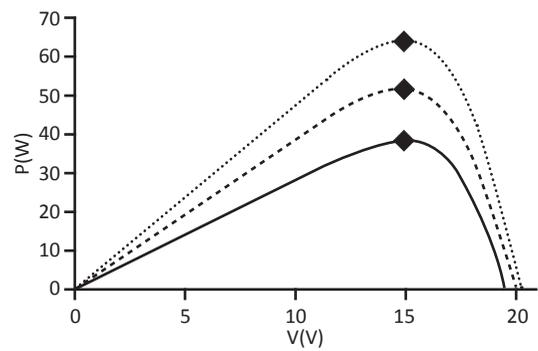


Figura 2 - Curva P-V simulada

servándose un único punto de potencia máxima al considerarse en la simulación que las celdas están iluminadas uniformemente.

CONVERTIDOR ELEVADOR (BOOST)

Los sistemas de seguimiento generalmente utilizan circuitos electrónicos conmutados de alta frecuencia para la búsqueda del Punto de Máxima Potencia. Estos convertidores DC-DC permiten modificar la potencia de salida de los paneles fotovoltaicos en función de una señal modulada. En el trabajo se utilizó un convertidor Boost que puede verse en la Fig. 3.

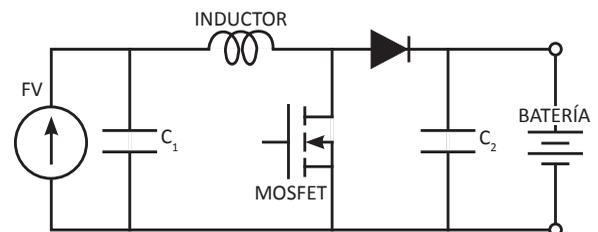


Figura 3 - Esquema del convertidor Boost

El MOSFET actúa como un interruptor: al cerrarse polariza el diodo en inversa produciendo almacenamiento de energía en el inductor debido al crecimiento lineal de la corriente (Hart, 2001). Al abrirse el MOSFET el diodo se polariza en forma directa conectando el inductor y la batería. La energía que adquiere el inductor en el proceso de carga se almacena en la batería.

En el trabajo se utilizaron dos paneles fotovoltaicos policristalinos de 80Wp cada uno con una eficiencia de conversión de celda mayor al 14% de acuerdo a la información ofrecida por el fabricante. Los paneles se utilizaron conectados en paralelo a la entrada del convertidor y en su salida y se utilizó un banco de baterías de 24V como carga. En la Fig. 4 se observan los paneles fotovoltaicos utilizados.

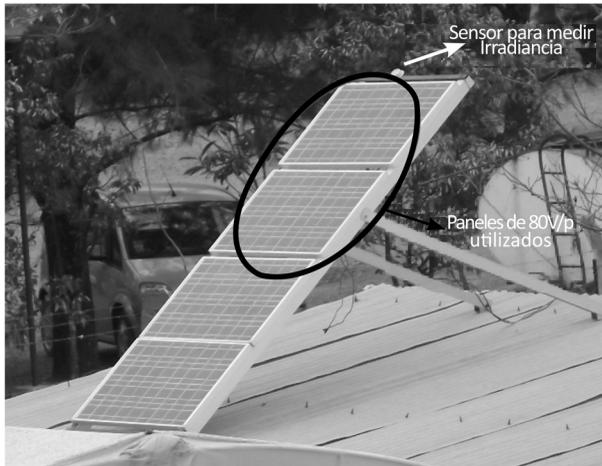


Figura 4 - Paneles fotovoltaicos utilizados

La expresión 9 describe una relación sencilla que vincula la entrada y salida del convertidor (Hart, 2001).

$$V_{FV} = V_{BAT} (1 - D) \quad (9)$$

La señal conmutada de entrada en el MOSFET tiene un periodo (T) fijo. Generalmente un porcentaje de este tiempo el transistor conduce y el resto permanece abierto. Este porcentaje de tiempo esta relacionado con la variable D inserta en la expresión 9, denominado “duty cycle”, y puede variar entre cero y uno. El tiempo de conducción del MOSFET lo determina el producto DT y el tiempo de corte $(1-D)T$. Al variar el duty cycle de 0 al 100% el convertidor permite barrer la curva $I-V$ del conjunto de paneles. En la Fig. 5 se observan cuatro curvas $I-V$, tres de ellas medidas en el exterior a la conexión paralelo y una obtenida al extrapolar los puntos a condición estándar.

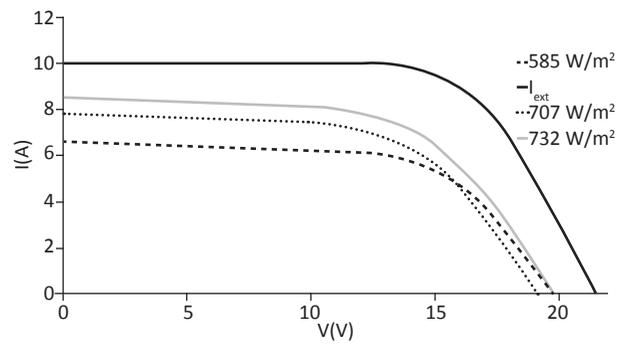


Figura 5 - Curvas $I-V$ medidas con el convertidor Boost

SISTEMA EXPERTO DE CONTROL DIFUSO (FLC)

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 y el bloque Defuzzyficador encargado de transformar la salida difusa en un valor no difuso. En la Fig. 6 se observa un esquema que describe la estructura de un sistema FLC.

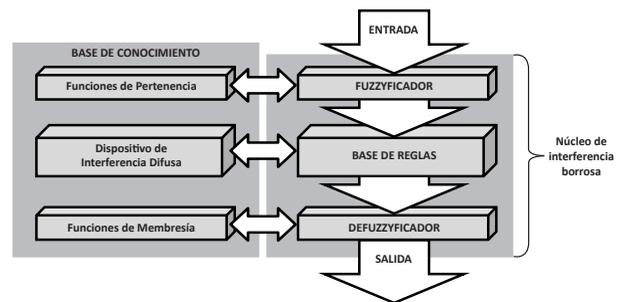


Figura 6 - Esquema de un FLC

Los FLC desarrollados como lógicas de control para implementarse en un sistema de seguimiento utilizan dos variables de entrada; la “pendiente” de la curva $P-V$ (E) del conjunto de paneles y su variación (DE). En la Fig. 2 se observa que la pendiente en la curva $P-V$ cambia de signo tomando valores positivos o negativos. Si recorremos

la curva comenzando en el punto donde la tensión del panel es la de circuito abierto y la potencia es cero se observa que la pendiente de la curva es negativa. A medida que la tensión del panel disminuye la pendiente se vuelve cero en el punto de máxima potencia y positiva al decrecer la potencia. Una aproximación para el cálculo de la pendiente en un punto de la curva $P-V$ de un panel puede realizarse a partir de la expresión 10.

$$\frac{\partial P}{\partial V}(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (10)$$

La curva $P-V$ muestra que su pendiente es un parámetro útil para realizar un adecuado seguimiento del punto de máxima potencia. Debido a ésto se define como variable de entrada para el sistema FLC junto a su variación definidas por la expresiones 11 y 12 (Esram y Chapman, 2007).

$$E(n) = \frac{\partial P}{\partial V}(n) \quad (11)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - \Delta(n-1) \quad (12)$$

En diferentes artículos el diseño de un FLC para realizar la búsqueda del punto de máxima potencia utilizan funciones triangulares para a fuzzificación, regla del mínimo para la implicación, funciones triangulares para el conjunto de salida y una defuzzificación por media de centros. En la Fig. 7 se observa el plano de control del FLC descrito utilizando el programa Xfuzzy 3.0.

APRENDIZAJE SUPERVISADO

Para la optimización del sistema de control se implementó un sistema FLC utilizando las mismas variables entradas, E y DE . Para su desarrollo se utilizó un sistema compuesto por funciones tipo campana para la fuzzificación, regla del producto para la implicación, funciones tipo campanas para el conjunto de salida y una defuzzificación por media difusa ponderada. El método utilizado para

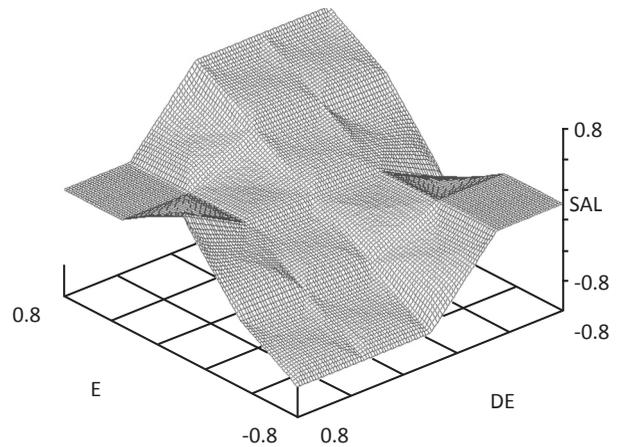


Figura 7 - Plano de control generalmente utilizado en un FLC para la búsqueda de máxima potencia

la aplicación del aprendizaje supervisado es el de Marquardt-Levenberg. Los datos utilizados como información para el aprendizaje supervisado se obtuvieron de datos medidos y simulados del conjunto de paneles fotovoltaicos ensayados. La información corresponde al barrido de la curva de los paneles con el primer FLC descrito. En la Fig. 8 se observa como varía el error entre los datos de entrada y salida del FLC a medida que el sistema ajusta las funciones que forman la base de conocimiento.

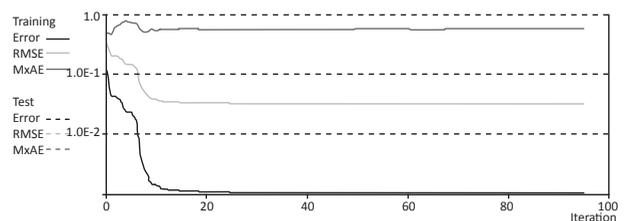


Figura 8 - Variación de los errores en la supervisión del aprendizaje

Para la implementación del aprendizaje se utilizó una herramienta de Xfuzzy 3.0 denominada Xfsl, en la cual se pueden encontrar diferentes métodos para su implementación, permitiendo monitorear el aprendizaje y supervisar variables como el error cuadrático medio y el error absoluto medio. El resultado final del aprendizaje se observa en el plano de control de la Fig. 9.

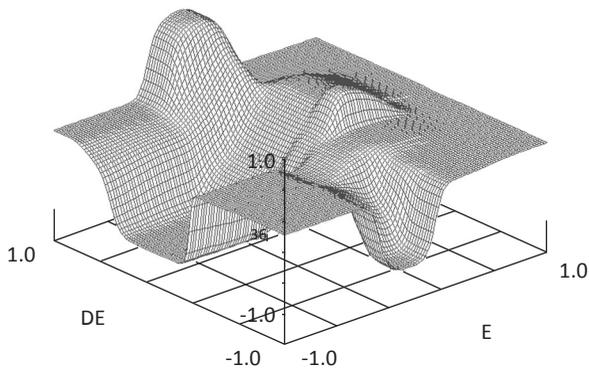


Figura 9 - Plano de control obtenido del aprendizaje

SIMULACIÓN Y RESULTADOS

En el trabajo se realizaron simulaciones para observar el comportamiento del FLC desarrollado. La Fig. 10 muestra la velocidad de convergencia al punto de máxima potencia del FLC con el plano de control de la Fig. 7 (negro) y un FLC con un plano de control de la Fig. 9 (discontinuo).

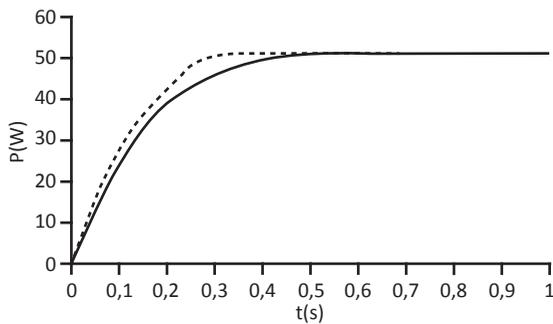


Figura 10 - Simulación de la velocidad de convergencia al punto de máxima potencia

Si bien se sabe que la velocidad de convergencia de un FLC es en general ocho veces mayor que el de un sistema que utiliza el algoritmo Perturbar y Observar (P&O), la simulaciones muestran que la implementación de un adecuado aprendizaje puede mejorar la misma.

El programa *Xfuzzy* 3.0 permite como opción crear las funciones Fuzzyficación, Lista de Reglas y Defuzzyficación del sistema FLC desarrollado en lenguaje C. Esta herramienta facilita la imple-

mentación física final, sin embargo, con el objetivo de optimizar los recursos del microcontrolador que se utilizará para realizar el cálculo de la salida del FLC y en el trabajo se diseño cada función. En la implementación final de la lógica de control se utilizó un microcontrolador de Microchip®: el PIC-32MX320F128H. En las Figs. 11, 12 y 13 se observa un día de medida en el exterior con registros de Irradiancia que llega a los paneles fotovoltaicos, temperatura ambiente (gris), temperatura de celda medida de forma indirecta por medio de la expresión 11 (negra) y potencia entregada por los dos paneles de 80Wp conectados en paralelo.

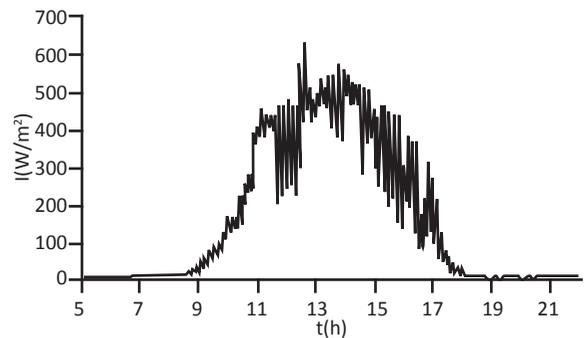


Figura 11 - Irradiancia medida que llega a los paneles

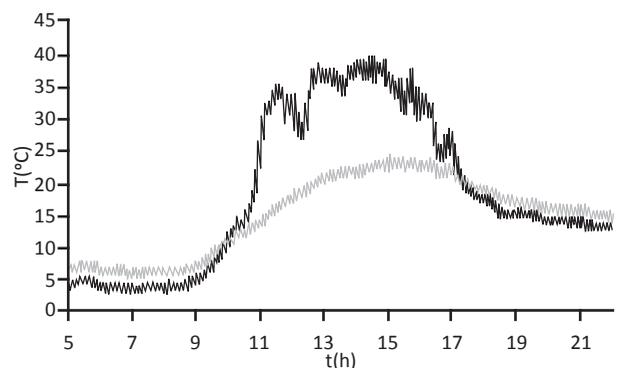


Figura 12 - Temperatura de celda (negra) y temperatura ambiente (gris)

El objetivo de este ensayo es el de observar el seguimiento del punto de máxima potencia a medida que la Irradiancia varía a lo largo de un día. En las medidas realizadas se observa que la potencia varía de forma proporcional a la Irradiancia, lo cual

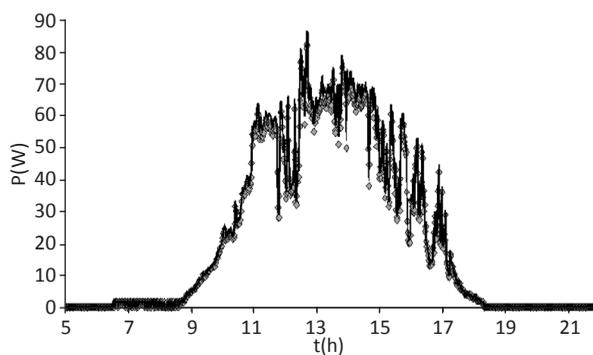


Figura 13 - Medida de potencia del conjunto de paneles y simulación

es un indicio de que el seguimiento es adecuado, pero también se observa que las simulaciones planteadas se ajustan a los valores medidos.

CONCLUSIONES

En el trabajo se estudiaron e implementaron diferentes FLC aplicados al seguimiento del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos. Sus diseños condujeron al desarrollo de librerías que permiten definir un núcleo de inferencia en microcontroladores. En el trabajo se aprecia cómo el sistema de aprendizaje permite optimizar el control y los resultados obtenidos muestran la flexibilidad y el potencial que tiene los sistemas FLC.

REFERENCIAS

Renaudineau, Houari, Martín, Pierfederici, Meibody-Tabar, Gerardin, "A new approach in tracking

maximum power under partially shaded conditions with consideration of converter losses". *Solar Energy* 85, 2580–2588, (2011).

Messai, Mellit, Guessoum, Kalogirou, "Maximum power point tracking using a GA optimized fuzzy logic controller and its FPGA implementation", *Solar Energy* 85, 265–277, (2011).

Shakil, Ismail, "Design and Implementation of Microcontroller Based Fuzzy Logic Control for Maximum Power Point Tracking of a Photovoltaic System". *6th International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2010*, 18-20, (2010).

Chaouachi, Kamel, Nagasaka, "A novel multi-model neuro-fuzzy-based MPPT for three-phase grid-connected photovoltaic system", *Solar Energy* 84, 2219–2229, (2010).

Esram, Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, pp. 439–449, (2007).

Del Brío, Sanz Molina, "Redes Neuronales y Sistemas Borrosos", primera edición, Ra-Ma, Madrid, España, (1997).

Duffie, Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", second ed. John Wiley & Sons Inc., New York, (1991).

Villalva, Gazoli, Ruppert, "Modeling and circuit – based simulation of photovoltaic arrays. *Brazilian Journal of Power Electronics*", 14, 35-45, (2009).

Remus Teodorescu, Rodríguez, "PV panel model based on datasheet values". *IEEE International Symposium on*, 2392-2396, (2007).

Almonacid, Rus, Hontoria, Fuentes, Nofuentes, "Characterisation of Si-crystalline PV modules by artificial neural networks", *Renewable Energy* 34, 941–949, (2009). Hart, "Electrónica de potencia". Pearson Education S. A. Madrid, (2001).