

## **IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO BASADO EN LÓGICA DIFUSA (FLC) PARA LA BUSQUEDA DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS**

**Roberto F. Farfán<sup>a</sup>, Carlos A. Cadena<sup>b</sup>, Luis T. Villa<sup>c</sup>**

<sup>a</sup> *INENCO (CONICET)-, Facultad de Ingeniería, U.N.Sa. Avda. Bolivia 5150 – Salta, Argentina.*

<sup>b</sup> *INENCO (CONICET)-, Facultad de Ciencias Exactas, U.N.Sa. Avda. Bolivia 5150 – Salta, Argentina.*

<sup>c</sup> *INIQUI (CONICET), Facultad de Ingeniería, U.N.Sa. Avda. Bolivia 5150 – Salta, Argentina.*

**Palabras claves:** Lógica Difusa, Punto de máxima potencia.

**Resumen:** Los sistemas basados en lógica difusa se utilizan ampliamente en el control de sistemas, debido a que un diseño adecuado permite: velocidad, precisión y flexibilidad en el control. La aplicación más extendida de la lógica difusa se encuentra en los sistemas expertos de control difuso basados en reglas, conocidos como FLC (Fuzzy Logic Controllers) o FIS (Fuzzy Interference Systems). En el siguiente trabajo se presenta un algoritmo FLC desarrollado para un control que permita la búsqueda del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaico. La búsqueda de este punto se realiza por medio de un convertidor CC-CC, manejado por un microcontrolador que lleva incorporado un algoritmo FLC. La utilización del convertidor CC-CC permite extraer la máxima potencia del panel fotovoltaico para distintos niveles de irradiancia solar y temperatura. En el trabajo se desarrolla el modelado, simulación e implementación experimental en microcontroladores PIC del sistema FLC propuesto.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos en la actualidad se presentan como una buena alternativa a la electrificación de los lugares que cuentan con buen recurso solar, alejados de las redes eléctricas convencionales. El aprovechamiento óptimo de la energía solar que llega a un panel fotovoltaico 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 de celda (Tina y Scrofani, 2008 ) (De Soto, Klein y Beckman, 2006 ) (Villalva, Gazoli y Ruppert, 2009 ) (Elshatter, Elhagry, Abou-Elzahab y Elkousy 2000 ). Por otro lado, este aprovechamiento óptimo también depende del punto de trabajo que impone una carga al conectarse al panel fotovoltaico, ya que por lo general este punto no es el de potencia máxima disponible (Koutroulis, Kalaitzakis y Voulgaris, 2001 ). Es por ello que la implementación de sistemas y algoritmos para la búsqueda del punto de máxima potencia tienen un papel trascendente en el rendimiento de un sistema fotovoltaico.

Los algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia se encuentran ampliamente estudiados y los métodos encontrados en la bibliografía varían de acuerdo: a la complejidad, los sensores requeridos para su implementación, la velocidad de convergencia del algoritmo, el costo, la eficiencia, entre otros (Esrám y Chapman, 2007). Entre los distintos métodos se encuentran algoritmos que basan su lógica de control en la variación de la tensión del arreglo fotovoltaico para obtener la potencia máxima (Koutroulis, Kalaitzakis y Voulgaris, 2001 ), como el algoritmo P & O (Perturbar y Observar), muy utilizado por su simplicidad de funcionamiento (Renaudineau, Houari, Martin, Pierfederici, Meibody-Tabar y Gerardin, 2011 ). También se encuentran desarrollos más robustos en cuanto al cálculo que realizan, basados en algoritmo genético (Zagrouba, Sellami, Bouaicha y Ksouri, 2010), algoritmos neuro-difusos (Chaouachi, Kamel y Nagasaka, 2010 ) o lógica difusa (Khan y Hossain, 2010. ) (Messai, Mellit, Guessoum y Kalogirou, 2011 ). La aplicación de estos algoritmos varía en su complejidad y su velocidad de convergencia al punto de máxima potencia. La aplicación de un sistema de control con estas prestaciones, en algunos casos nos lleva a trabajar con microcontroladores con determinadas características para realizar el cálculo.

En este trabajo se optó por desarrollar un buscador de máxima potencia utilizando como lógica de control un algoritmo basado en lógica difusa. En la bibliografía se encuentran diferentes estructuras de algoritmos FLC que pueden implementarse para la búsqueda del punto de máxima potencia (Khan y Hossain, 2010. ) (Esrám y Chapman, 2007). En este trabajo se implementara uno de estos algoritmos, cuya base de conocimiento se estudia, planteando simulaciones que permitan describir de forma detallada el trabajo que realiza el algoritmo en el sistema de control. La implementación final se realiza utilizando un convertidor DC-DC manejado por un microcontrolador PIC 18f2550.

## 2 MODELO DE PANEL FOTOVOLTAICO Y CURVAS I-V

El panel fotovoltaico constituye la principal fuente de energía de una instalación autónoma fotovoltaica y es el resultado de asociar un conjunto de celdas fotovoltaicas en serie y paralelo. En la Figura 1 se observa el modelo que se utiliza en el trabajo para representar un panel fotovoltaico en condiciones de iluminación, el mismo también puede utilizarse para representar una celda fotovoltaica o un conjunto de paneles (Duffie and Beckman, 1991; Villalva et al., 2009).

En la Fig. 1 se observa el modelo que se utiliza en el trabajo para representar un panel fotovoltaico en condiciones de iluminación, el mismo también puede utilizarse para

representar una celda fotovoltaica o un conjunto de paneles (Duffie y Beckman, W.A., 1991) (De Soto, Klein, Beckman, 2006 ). 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).

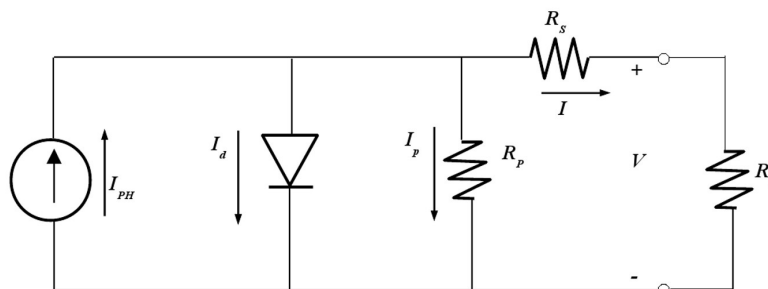


Figura 1. Modelo de panel fotovoltaico.

$$I = I_{PH} - I_0 \left( e^{\left( \frac{V+I R_s}{n_s V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{(V+I R_s)}{R_p} \tag{1}$$

$$V_t = \frac{nKT}{q} \tag{2}$$

$I_{PH}$  = Corriente fotogenerada.

$I_0$  = Corriente de saturación inversa.

$V_t$  = Voltaje térmico dado por la expresión (2).

$n_s$  = Número de celdas fotovoltaicas conectadas en serie en el panel.

$R_s$  = Resistencia serie.

$R_p$  = Resistencia paralelo.

T= temperatura de celda.

K = Constante de Boltzmann.

q = carga del electrón.

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 ambiente, y parámetros internos como su resistencia serie, resistencia paralelo y factor de idealidad del diodo, entre otros (Tina, Scrofani, 2008 ) (De Soto, Klein, y Beckman, 2006 ) (Villalva, Gazoli y Ruppert, 2009 ). La eficiencia de un panel fotovoltaico se encuentra relacionada de forma directa con estos parámetros, generalmente desconocidos (De Soto, , Klein y Beckman, 2006 ). Diferentes artículos resaltan la relación entre la temperatura y la resistencia serie, resistencia paralelo y el factor de idealidad del diodo, sin embargo este detalle no es relevante en el objetivo que tienen las simulaciones planteadas en este trabajo, de manera que los mismos se toman como constantes. Por otro lado, la corriente fotogenerada se encuentra relacionada en forma directa con la irradiancia y en menor medida con la temperatura, utilizándose la ecuación (3) para describir su variación (Villalva, Gazoli y Ruppert, 2009 ).

$$I_{PH} = \left( I_{PHn} + K_1 (T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} \tag{3}$$

$I_{PHn}$ = corriente fotogenerada a  $1000\text{W/m}^2$ .

$K_1$ = coeficiente corriente de cortocircuito temperatura ( $\text{A}/^\circ\text{K}$ ).

$T_n$ = temperatura de condición estandar ( $298^\circ\text{K}$ ).

$G_n$ =  $1000\text{ W/m}^2$ .

La corriente de saturación inversa también es modelada, definiéndose en la expresión 4.

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

$I_{0n}$ = corriente de saturación inversa a  $1000\text{W/m}^2$ .

$E_g$ = energía del gap del semiconductor.

$n$ = factor de idealidad del diodo.

La temperatura de celda del panel fotovoltaico generalmente no tiene un cálculo directo y puede determinarse realizando un balance térmico en el panel fotovoltaico. Este balance se realiza planteando las siguientes ecuaciones.

$$\alpha_g G + \left( \frac{\lambda_g}{d_g} \right) (T - T_g) = h_{cga} (T_g - T_a) + h_{rgs} (T_g - T_a) \quad (5)$$

$$\left( \frac{\zeta_g \alpha}{1 - (1 - \alpha)(1 - \zeta_g)} - \eta \right) G = \left( \frac{\lambda_g}{d_g} \right) (T - T_g) + \left( \frac{\lambda_t}{d_t} \right) (T - T_t) \quad (6)$$

$$\left( \frac{\lambda_t}{d_t} \right) (T - T_t) = h_{cta} (T_t - T_a) \quad (7)$$

En las expresiones 5, 6 y 7 los parámetros que no tienen subíndice pertenecen a la celda fotovoltaica, el resto responde a la siguiente nomenclatura.

$\alpha$ = factor de absorción.

$\lambda$ = conductividad térmica ( $\text{W/mK}$ ).

$\zeta$ =transmitancia.

$\eta$ = eficiencia eléctrica.

$d$ = ancho en m.

$h$  = coeficiente de transmisión térmica ( $\text{W/m}^2 \text{K}$ )

$a$ =ambiente.

$c$ = convectivo.

$g$ = vidrio templado.

$r$ = radiativo.

$t$  = tedlar.

$s$ = cielo.

Conociendo los valores de irradiancia y temperatura ambiente, las incógnitas planteadas en las últimas ecuaciones son temperatura de vidrio templado, temperatura de teldar y temperatura de celda que es la importante a determinar.

### 3 MEDIDAS Y SIMULACIÓN DE CURVAS I-V

En el trabajo se realizaron medidas de paneles fotovoltaicos de 80WP de la marca SOLARTEC®. Estas medidas se realizaron para obtener los parámetros pertenecientes al panel fotovoltaico y poder realizar simulaciones del mismo bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura. Las curvas I-V obtenidas de los ensayos con iluminación se las obtuvieron utilizando una carga electrónica capacitiva conectada a una PC. En la Fig. 2 se observa la curva I-V perteneciente al cuarto cuadrante del panel fotovoltaicos que se utilizara en el trabajo, ensayados bajo condición de iluminación. La curva del panel fotovoltaicos 1 se midió bajo una irradiancia y temperatura ambiente de  $968\text{W/m}^2$  y  $34^\circ\text{C}$ .

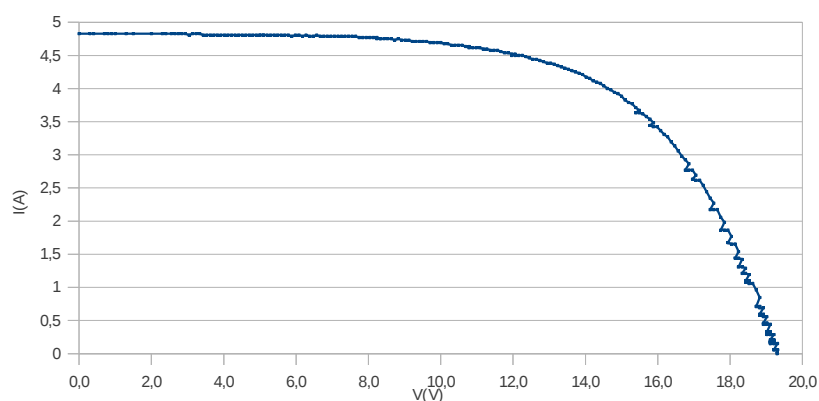


Figura 2. Curva I-V de un paneles fotovoltaico de 80 WP medida.

La información proveniente de las curvas I-V de los paneles fotovoltaicos se extrapoló a una irradiancia de  $1000\text{W/m}^2$  y a una temperatura de celda de  $25^\circ\text{C}$ . La información entregada por las curvas extrapoladas permite encontrar los parámetros aproximados de cada panel bajo condiciones estándares, utilizando el algoritmo descrito en la trabajo de Remus Teodorescu and Rodriguez (2007), cuyos resultados se observa en la tablas 1.

Los parámetros descriptos en las tablas 1 describen los parámetros del panel fotovoltaicos de 80WP, información que se utilizara para simular su respuesta bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura.

Medidas extrapoladas				Parámetros aproximados				
Voc(V)	Isc(A)	Vmp(V)	Imp(A)	Rs( $\Omega$ )	Rp( $\Omega$ )	Vt(V)	Iph(A)	I <sub>0</sub> (A)
20,2	4,82	15,1	4,21	0,49	222	$39 \cdot 10^{-3}$	4,83	$26 \cdot 10^{-7}$

Tabla 1. Parámetros del panel fotovoltaico P1 de 80WP a  $1000\text{W/m}^2$  y  $T_c=25^\circ\text{C}$

En la Fig. 3 se observa la curva I-V de un panel fotovoltaico 1 y su punto de máxima potencia bajo la influencia de distintos valores de irradiancia. Para las curvas pertenecientes a la Fig. 3 se mantuvieron constante la resistencia serie, la resistencia paralelo y el factor de idealidad del diodo descriptos en la tabla 1.

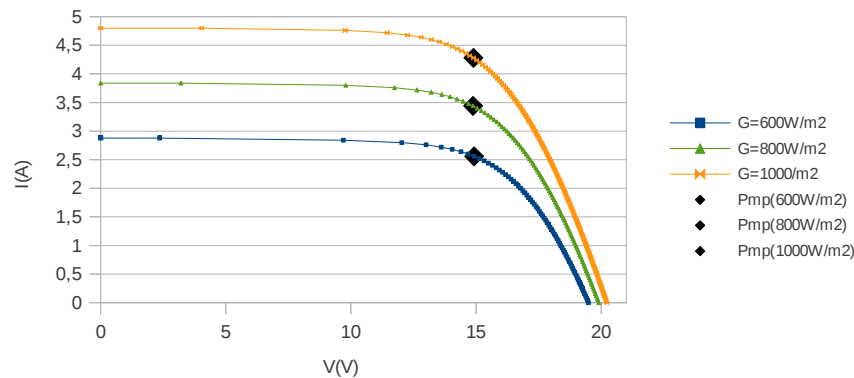


Figura 3. Curva I-V del panel fotovoltaico de 80 WP simulada.

En la Fig. 4 se observa las curvas características P-V del panel fotovoltaico 1, donde se observa con mayor claridad la ubicación del punto de máxima potencia. Los valores de corriente y tensión del punto de máxima,  $I_{mp}$  y  $V_{mp}$  respectivamente, caracteriza este punto que es único para cada curva y varía conforme cambia la irradiancia y temperatura.

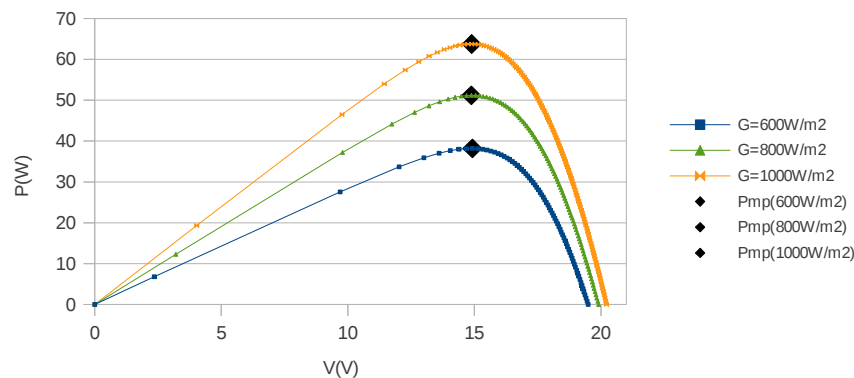


Figura 4. Curva P-V del panel fotovoltaico de 80 WP simulada.

#### 4 SISTEMA EXPERTO DE CONTROL DIFUSO (FLC)

Los FLC necesitan ordenar su estructura lógica en el Núcleo de Inferencia Difusa. En el Núcleo encontramos tres bloques, donde cada uno de ellos cumplen una determinada función dentro del algoritmo, el bloques denominado Fuzzyficador, Evaluación de Reglas y el Defuzzyficador, como indica la figura 5 [Brío, 1997].

Las variables que ingresan al Núcleo son valores de entrada no difuso, siendo estas las señales eléctricas que brindan información del panel fotovoltaico y que se las obtiene mediante la conversión A/D. Las entradas ingresan al bloque Fuzzyficador, definiéndose en él los distintos conjuntos difusos denominados de entrada, que se encargan de transformar el valor no difuso de entrada en uno difuso. La información Fuzzyficada ingresa al bloque Evaluación de Reglas, donde se relacionan los conjuntos difuso de entrada con un conjunto difuso de salida mediante un grupo de sentencias. La información obtenida del bloque Evaluación de reglas ingresa al Bloque Defuzzyficador para transformar, ésta entrada difusa en un valor no difuso a la salida del núcleo, utilizándose una función denominada de membresía para tal fin. En estos bloque se definen Funciones de pertenencia, una Lista de Reglas y funciones de Membresía, formando la Base de Conocimiento del sistema.

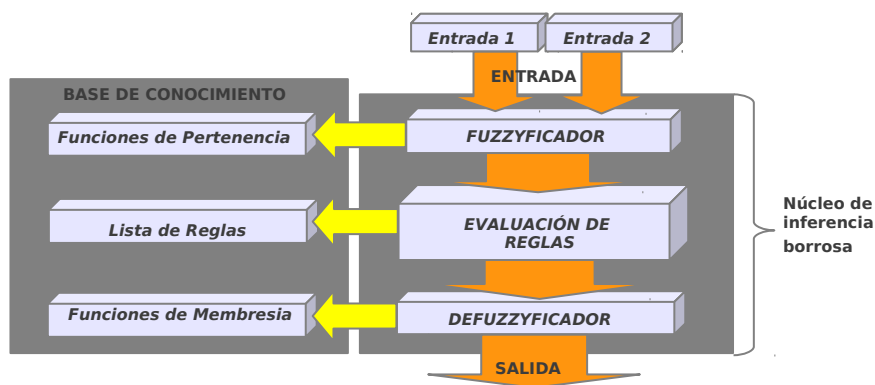


Figura 5. Esquema básico de un sistema Difuso.

Distintos artículos describen diferentes estrategias para definir la base de conocimiento de un sistemas FLC aplicado a la búsqueda del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos (Khan y Hossain, 2010. ) (Esram y Chapman, 2007). En este trabajos se definen un conjunto de reglas en base a la información que entrega la pendiente de la curva P-V de un panel fotovoltaico, como muestra la figura 7.

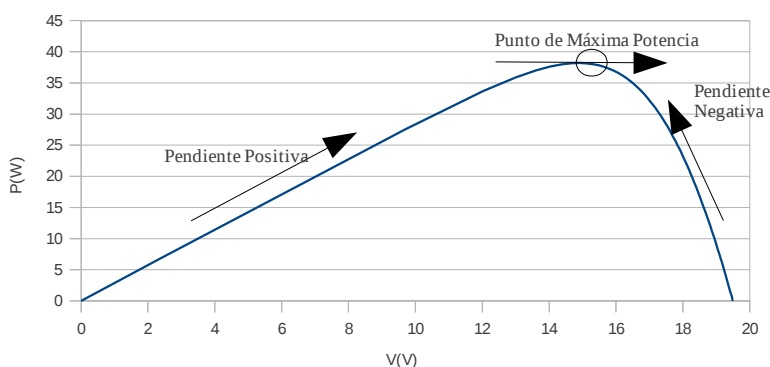


Figura 7. Características de la pendiente en la curva P-V de un panel fotovoltaico.

En la figura 7 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 a medida que comienza a 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 8.

$$\frac{\partial P}{\partial V}(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (8)$$

Esta aproximación se vuelve más precisa cuando la diferencia de potencial entre el punto  $V(n)$  y  $V(n-1)$  tiende a cero. La pendiente es un parámetro adecuado para el seguimiento del punto de máxima potencia en un panel fotovoltaico, debido a ésto se define la misma como variable de entrada para el sistema FLC, junto a su variación definidas como muestra la expresión 9 y 10 (Khan y Hossain, 2010 ) (Esram y Chapman, 2007).

$$E(n) = \frac{\partial P}{\partial V}(n) \quad (9)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (10)$$

Las variables definidas en estas últimas expresiones generalmente se normalizan (Khan y Hossain, 2010) (Esrarn y Chapman, 2007), de manera que la información proveniente del sistema que se desea controlar toma valores entre  $[-1,1]$ , como indica el dominio de las funciones de pertenencia de la figura 8.

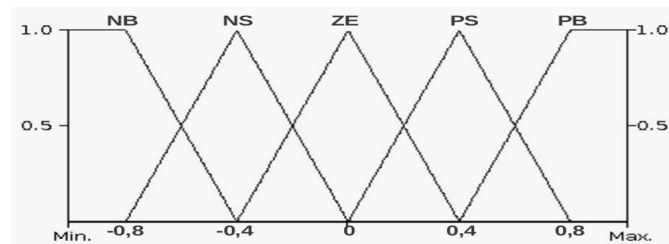


Figura 8. Definición de la función de pertenencia para los conjuntos de entrada y salida.

$\Delta E$ E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Figura 9. Definición del conjunto de reglas.

La función de pertenencia que esquematiza la última figura se utiliza para definir los conjuntos de entrada y salida, permitiendo fuzzyficar las estradas  $E(n)$  y  $\Delta E(n)$ . La lista de reglas definidas en la base de conocimiento se encuentran definidas como se muestra en la figura 9 (Khan y Hossain, 2010) (Esrarn y Chapman, 2007).

## 5 DESARROLLO DE LA LÓGICA DEL FLC

El diseño de la Base de conocimiento del sistema de lógica difusa se realizó inicialmente utilizando el programa Xfuzzy 3.0. Este programa permite el desarrollo de sistemas difusos y combina un conjunto de herramientas que facilitan las distintas etapas del proceso de diseño. En el bloque Fuzzyficador se definieron las funciones de pertenencia denominadas  $E$  y  $\Delta E$ , con las características que se observa en la figura 8. El conjunto de reglas definido responde a la matriz definida en la figura 9. En la figura 10 se observa una ventana del programa Xfuzzy 3,0 utilizando la función Xfmt, la cual permite variar la magnitud de las entradas y observar la salida del sistema definido.



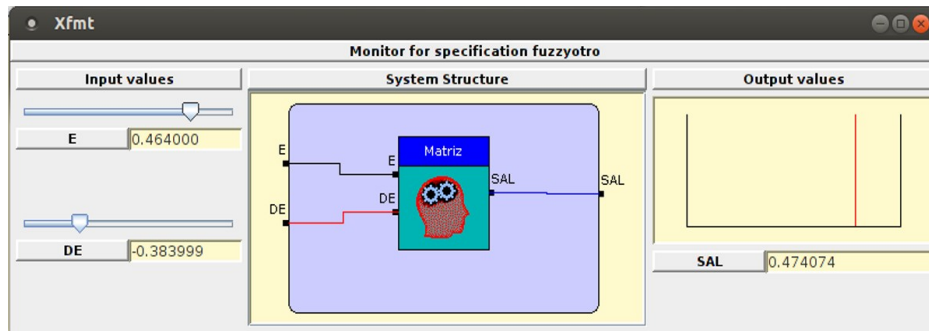


Figura 10. Monitoreo del sistema de lógica difusa desarrollado.

En la figura 11 se observa el plano de control que describe la respuesta del sistema de lógica difusa en función de las variables de entrada.

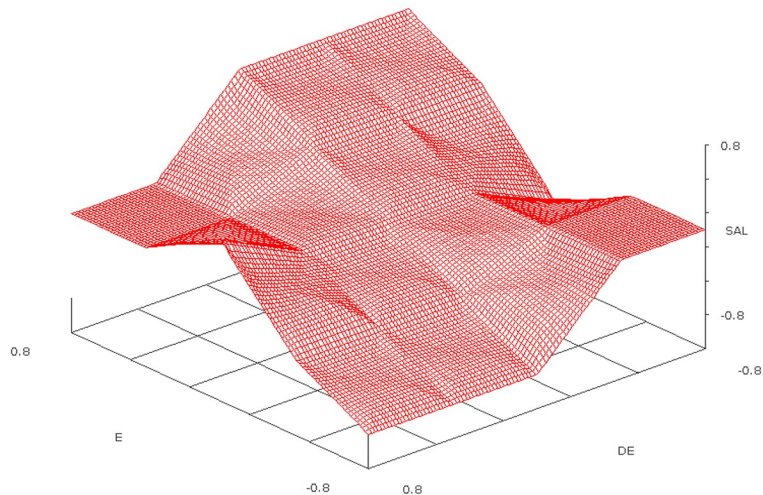


Figura 13. Plano de control.

El programa Xfuzzy 3.0 permite como opción crear las funciones Fuzzyficación, Lista de Reglas y Defuzzyficación, en lenguaje C del sistema FLC desarrollado. De manera que el programa permite generar el código del sistema FLC para la implementación física final. Sin embargo, con el objetivo de optimizar los recursos de un microcontrolador para realizar el cálculo de la salida del FLC, en el trabajo se diseñó cada función utilizando Xfuzzy como referencia para el cálculo. Este código se desarrolló pensando en utilizar la menor cantidad posible de variables y hacer un algoritmo más eficiente, teniendo en cuenta las limitaciones que un microcontrolador. Este trabajo permite agilizar el cálculo en el microcontrolador y optimizar sus recursos.

## 6 CIRCUITO DE POTENCIA Y MICROCONTROLADOR

Para la búsqueda del punto de máxima potencia se utilizó un convertidor CC-CC que funciona a través de una señal PWM. Los dispositivos más utilizados para esta implementación son los convertidores buck y boost. Diferentes estudios resaltan algunas

ventajas de los “convertidores boost” sobre el buck, sin embargo en este trabajo se utilizó un “convertidor buck” debido a que este tipo de convertidor ya se utilizó en otros trabajos.

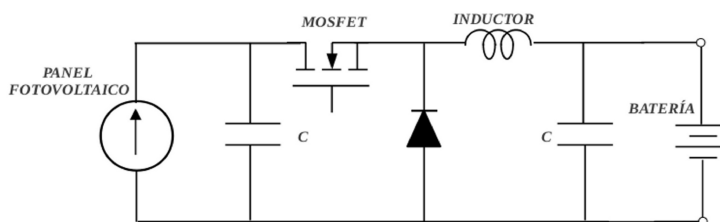


Figura 14. Esquema del circuito buck utilizado.

Para este convertido se utilizó un MOSFET IRF3205, que entre sus características más importantes se encuentran la corriente que pueden llegar a manejar y su potencia de disipación, 110A y 50W respectivamente. Para este convertidor se diseñó una bobina de 0,0021 H y se trabajo con un periodo de PWM de 0,0001 seg.

Para la implementación de la lógica de control del FLC se utilizó un microcontrolador PIC 18f2550. Este microcontrolador se utilizó por ser sencillo de programar, cuenta con 10 entradas para conversión A/D, puede definirse la modulación por ancho de pulso y permite realizar una conexión vía USB. Por otro lado, el algoritmo FLC no realiza cálculos complejos, como ajustes a su base de conocimiento por medio de algún método como gradiente descendente.

## 7 SIMULACIÓN DEL SISTEMA FLC Y SU IMPLEMENTACIÓN

En la figura 4 se observan tres curvas P-V simuladas para distintos tipos de irradiancia perteneciente al panel fotovoltaico. En el trabajo se simuló el comportamiento del sistema FLC utilizando como variables de entrada los valores de E y  $\Delta E$  generados con la información que entregan las curvas P-V.

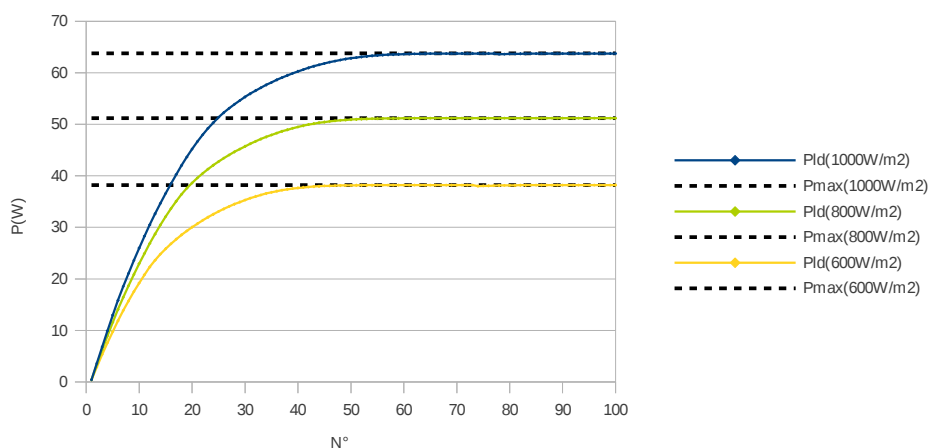


Figura 14. Variación de potencia realizado por el FLC en función del número de incrementos de voltajes.

En todos los casos propuestos se observó una clara convergencia al punto de máxima potencia, como se observa en la figura 14, donde se grafica la potencia del panel fotovoltaico en función del número de incrementos de tensión que el sistema FLC propuso para la

búsqueda del punto de máxima potencia. En este gráfico las líneas punteadas indican el valor de potencia máxima del panel fotovoltaico ( $P_{max}$ ) para cada situación. Las simulaciones muestran que a medida que se modifica el voltaje, la potencia del panel fotovoltaico se estabiliza en inmediaciones al punto de máxima potencia, mientras que el voltaje se estabiliza en la tensión de máxima potencia, como indica la figura 15.

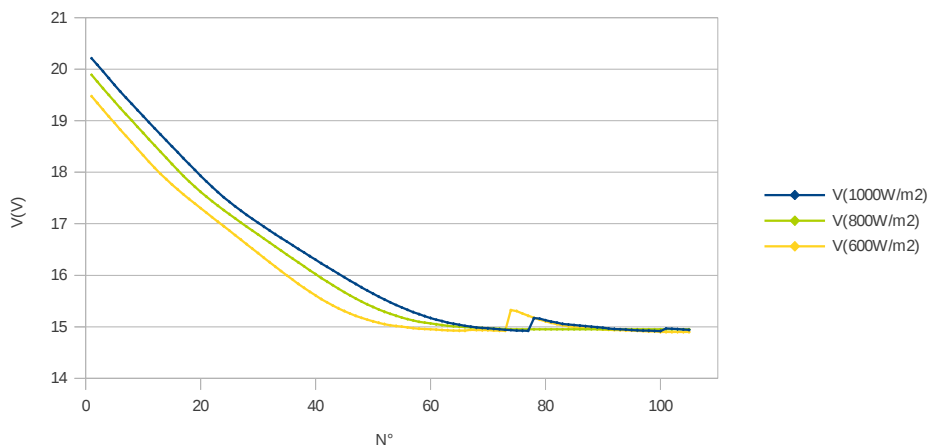


Figura 15. Variación de potencia realizado por el FLC en función del número de incrementos de voltajes.

En la figura 16 se observa como varia la salida del sistema FLC a medida que el sistema busca el punto de máxima potencia. En esta figura se observa claramente que la salida del sistema tiende a cero, significando que el sistema FLC converge al punto de máxima potencia.

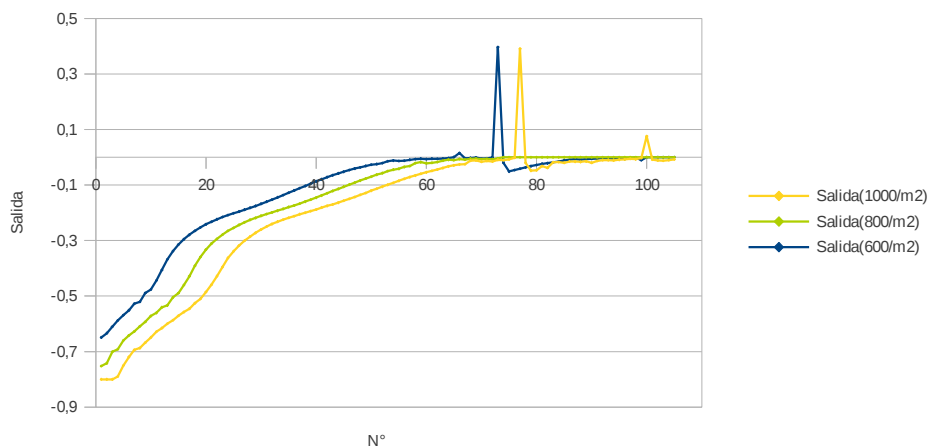


Figura 16. Variación de potencia realizado por el FLC en función del número de incrementos de voltajes.

En el trabajo también se realizaron simulaciones variando la irradiancia y temperatura ambiente que afectan al panel fotovoltaico a lo largo de un día. Estas variaciones modifican la curva P\_V del panel fotovoltaico y permiten realizar un seguimiento de la respuesta del FLC. Para los valores de la irradiancia total que llega al panel fotovoltaico se utilizaron medidas reales de irradiancia, tomadas en la provincia de Salta (Argentina), en la U.N.Sa. En el instituto INENCO, como se observa en la figura 17.

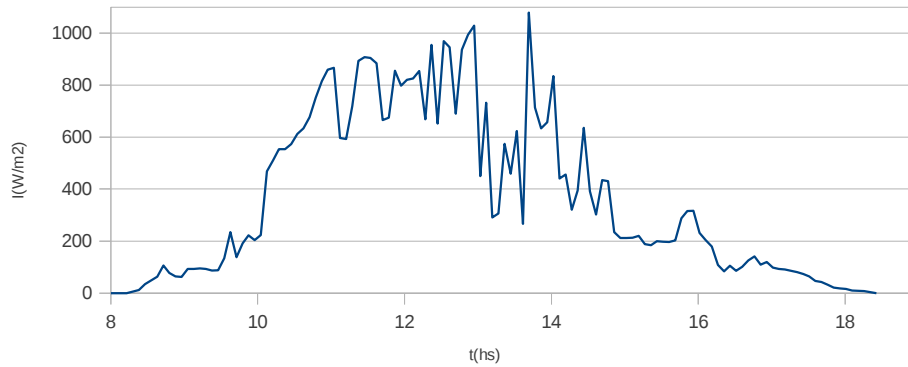


Figura 17. Irradiancia total utilizada en la simulación.

Para modelar la temperatura ambiente en el trabajo se necesita del ingreso de la temperatura mínima y máxima del día simulado. La variación de temperatura supone:

La temperatura ambiente máxima se produce siempre dos horas después del mediodía solar.

La temperatura ambiente mínima se produce siempre al amanecer.

Entre estos dos instantes, la temperatura ambiente evoluciona de acuerdo con dos semiciclos de dos funciones coseno.

En la figura 18 se muestra la temperatura ambiente simulada suponiendo una temperatura máxima de 28°C y una temperatura mínima de 15°C.

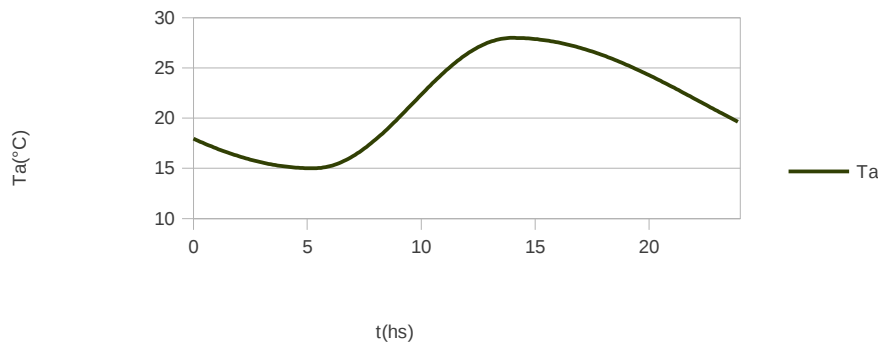


Figura 18. Simulación de temperatura ambiente.

Para esta variación de irradiancia y temperatura ambiente se simuló el comportamiento del sistema FLC con el panel fotovoltaico, calculando por separado el punto de máxima potencia real en cada instante y el estimado por el FLC (Pld). En la figura 19 se observa la potencia real del panel fotovoltaico con líneas continuas y el cálculo realizado por el FLC con puntos, poniendo de manifiesto un certero calculo del punto de máxima potencia realizado por el FLC.

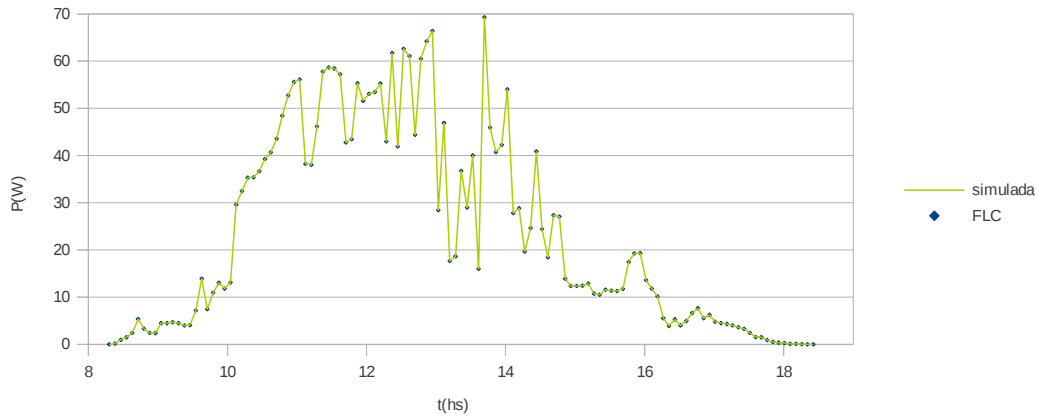


Figura 17. Simulación de la potencia máxima durante el día del paneles fotovoltaicos y cálculo del punto de máxima potencia del FLC.

En la figura 18 se observa una de las implementaciones realizada, mostrándose el comportamiento del sistema FLC desarrollado y la respuesta esperada a través de la simulación. Se puede observar que el sistema desarrollado responde con adecuadamente y su comportamiento es similar al esperado.

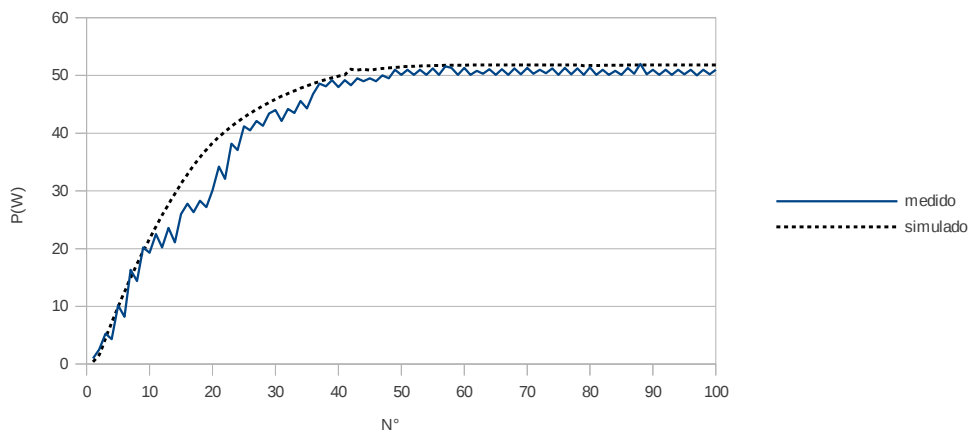


Figura 18. Comparación entre la respuesta del FLC desarrollado y simulado.

## 8 CONCLUSIONES

En el trabajo se desarrolla un sistema FCL implementado para la búsqueda del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos. El desarrollo del sistema permitió estudiar y elaborar criterios que se implementan en la búsqueda del punto de máxima potencia. El desarrollo permitió profundizar en el estudio de los sistemas FLC y elaborar desarrollos en microcontroladores sencillos como el PIC 18f2550. En el trabajo también se plantearon simulaciones que permiten estudiar la dinámica el sistema fotovoltaico y probar los sistemas de control desarrollados. En la implementación del sistema FLC se observa la eficiencia y el gran potencial de los sistemas de control difusos.

## REFERENCIAS

- A. Messai, A. Mellit, A. Guessoum, S.A. Kalogirou. Maximum power point tracking using a GA optimized fuzzy logic controller and its FPGA implementation. *Solar Energy* 85, 265–277, 2011.
- Aymen Chaouachi, Rashad M. Kamel, Ken Nagasaka. A novel multi-model neuro-fuzzy-based MPPT for three-phase grid-connected photovoltaic system. *Solar Energy* 84, 2219–2229, 2010.
- B. Martín del Brío, A. Sanz Molina. *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*, primera edición, Ra-Ma, Madrid, España, 1997.
- C. Duffie, J.A., Beckman, W.A.. *Solar Engineering of Thermal Processes*, second ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.
- De Soto, W., Klein S.A., Beckman, W.A.. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy* 80, 78–88, 2006.
- Remus Teodorescu, D.S., Rodriguez, P.. PV panel model based on datasheet values. *IEEE International Symposium on*, 2392-2396, 2007.
- Salam, Z., Ishaque, K., Taheri, H.. An improved two-diode photovoltaic (PV) model for PV system. *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on*, 1-5, 2010.
- Tina, G.M., Scrofani, S.. Electrical and Thermal Model for PV Module Temperature Evaluation. *The 14th IEEE Mediterranean*, 585-590, 2008.
- De Soto, W., Klein S.A., Beckman, W.A.. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy* 80, 78–88, 2006.
- Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis, and Nicholas C. Voulgaris. Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. *IEEE transactions on power electronics*, Vol. 16, N° 1, 46-53, 2001.
- Elshatter, Th.F., Elhagry, M.T., Abou-Elzahab, E.M., Elkousy, A.A.T.. Fuzzy modeling of photovoltaic panel equivalent circuit. *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, 1656 – 1659, 2000.
- Gang Feng. A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, VOL. 14, N°5, 676-697, 2006.
- H. Renaudineau, A. Houari, J.-P. Martin, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar, B. Gerardin. A new approach in tracking maximum power under partially shaded conditions with consideration of converter losses. *Solar Energy* 85, 2580–2588, 2011.
- K. Sopian, K. S. Yigit, H. T. Liu, S. Kaka, T. N. Veziroglu. Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. *Energy Convers. Mgmt Vol.* 37, No. 11, pp. 1657-1670, 1996.

- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Ruppert F., E.. Modeling and circuit – based simulation of photovoltaic arrays. *Brazilian Journal of Power Electronics*, 14, 35-45, 2009.
- M.R. Yousefi , M.Bayati Poudeh , S.Eshthardiha. Improvement Performance of Step-Down Converter through Intelligent Controllers. 4th International IEEE Conference "Intelligent Systems", 4,20-24, 2008.
- M. Zagrouba, A. Sellami, M. Bouaicha, M. Ksouri. Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms:Application to maximum power extraction. *Solar Energy* 84, 860–866, 2010.
- Shakil Ahamed Khan, Md. Ismail Hossain. 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.
- Trishan Eswam and PatrickL. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,” *IEEE Energy Conversion*, Vol.22, No. 2, pp439-449, June 2007.
- Weidong Xiao, Nathan Ozog, William G. Dunford. Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking. *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 54, N° 3, 1696-1704, 2007.