



## SISTEMA BASADO EN CONOCIMIENTO PARA BATERÍAS DE PLOMO ÁCIDO APLICADO A MICROCONTROLADORES PIC

**R. F. Farfán, C. Cadena**

U.N.Sa. Facultad de Ingeniería

INENCO (Instituto de Energías No Convencionales) Av. Bolivia 5152 C.P 4400

CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas)

<http://www.inenco.net> 03874255578, fede\_farfan@hotmail.com

CIUNSa (Consejo de investigación UNSa) Av. Bolivia 5152 C.P 4400 <http://www.unsa.edu.ar>

**RESUMEN:** En el siguiente trabajo se evalúa el comportamiento de un algoritmo de control, incorporado en un microcontrolador PIC que actúa como cerebro de un regulador fotovoltaico. Este algoritmo se diseñó utilizando lógica difusa y en el trabajo se realizó un seguimiento del plano de control que usa el sistema en la carga de baterías de plomo ácido. Para desarrollar un sistema de control difuso, se necesita información del comportamiento del sistema a controlar y volcar esta información en la base de conocimiento. Este conocimiento se adquiere de los modelos de baterías y la lógica de control se desarrolló utilizando un software denominado Xfuzzy 3.0 [Farfán, 2009]. Para este trabajo se utilizó el PIC 18f4550 y se evaluó el funcionamiento del regulador difuso utilizando un toma de datos conectado a una PC, realizándose un seguimiento del plano de control para observar el comportamiento del algoritmo.

**Palabras claves:** Fotovoltaico, reguladores, baterías, lógica borrosa.

### INTRODUCCIÓN

El cuidado de una batería y el seguimiento de su comportamiento, es fundamental para el correcto funcionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo, debido a que la energía que los paneles pueden entregar durante las horas de sol se almacena en esta. Algunas variables importantes para la vida útil del sistema acumulador son los estados de carga, al terminar la inyección de energía que realizan los paneles fotovoltaicos y al cortar la corriente cuando la carga es baja. Es por ello que un elemento regulador se vuelve importante en este tipo de sistema. El regulador de carga trabaja inmerso en el sistema fotovoltaico y tiene como objetivo preservar el banco de baterías en las situaciones de sobrecarga, optimizar la energía captada por los paneles fotovoltaicos y finalmente, cuidar que la profundidad de descarga de la batería no sea excesiva.

Existen reguladores de carga que utilizan solo la tensión de bornes de la batería como un indicador del estado de carga, sin embargo se sabe que llevar el control de carga de una batería midiendo solo esta magnitud puede llevar al banco acumulador a la destrucción, debido a los bajos estados de carga finales [Gasquet, 2007]. Distintos modelos de acumuladores describen el comportamiento de las celdas electroquímicas de una batería por medio de magnitudes eléctricas y térmicas, es por ello que la inclusión de algoritmos elaborados que controlen los estados de carga de un banco acumulador no es algo ilógico, si se desea optimizar la carga en función de magnitudes que sean sencillas de medir.

Las magnitudes más influyentes para determinar el estado de carga en un acumulador y que son sencillas de medir son: la tensión de bornes de una batería, la temperatura de trabajo de la batería y la corriente que ingresa al acumulador en un determinado tiempo [Lorenzo, 1994]. Debido a esto, los reguladores de carga deben tener en cuenta estas variables al realizar el control del flujo de energía del sistema fotovoltaico. Trabajar con este conjunto de variables para estimar el momento que la batería se encuentra cargada, nos hace trabajar con mucha incertidumbre debido a que ninguna de estas variables nos permite medir directamente los estados de carga de una batería. Debido a esto, se desarrolló un sistema de regulación basado en conocimiento, implementando lógica difusa. En este sistema de control se define un conocimiento en la lógica de control en base a un modelo matemático que describe el comportamiento de una batería [Farfán, 2009]. Las variables de entrada del sistema son: la Tensión de bornes de la batería, la Temperatura ambiente y la Corriente que ingresa a la batería. En función de estas entradas, se realiza un cálculo en el regulador que permite la estimación del punto de gaseo de la batería, realizándose una regulación de la corriente en inmediaciones de este punto hasta cortar la misma.

Trabajar en la implementación de todo sistema de control basada en lógica difusa necesita de un tiempo importante de desarrollo antes de ponerlo en marcha, debido a que inicialmente se necesita volcar la información del sistema a controlar en la base de conocimiento del controlador difuso, se debe simular el comportamiento del mismo dentro del sistema a controlar y en función de estos resultados, se debe ajustar la base de conocimiento. Finalmente se debe buscar un interprete de la lógica desarrollada, tarea que no es sencilla si se desea incorporar la lógica en un circuito integrado programable que actúe en una instalación fotovoltaica aislada. Gran parte del trabajo desarrollado se enfoca en este punto y en el seguimiento del comportamiento del regulador.

## ESQUEMA DEL REGULADOR DE CARGA

El regulador de carga difuso es un circuito electrónico compuesto por un bloque control y un bloque de potencia. El bloque de control está integrado por un microcontrolador PIC 18F4550, al cual se le incorporó en su memoria un algoritmo basado en lógica difusa. La información del sistema fotovoltaico ingresa al bloque de control por medio de cuatro conversores A/D de 10 bits que pertenecen al microcontrolador, esta es incorporada al algoritmo como entrada del sistema difuso y una vez analizada la información, la señal de salida del algoritmo difuso se relaciona con un número entero. Este número entero actúa como entrada en la configuración una señal PWM que el microcontrolador saca por los puertos de salida. La señal modulada ingresa a un transistor npn que comanda los MOSFET del bloque de potencia, regulando la corriente de entrada del sistema Fotovoltaico. En la figura 1 se esquematiza el funcionamiento del regulador difuso.

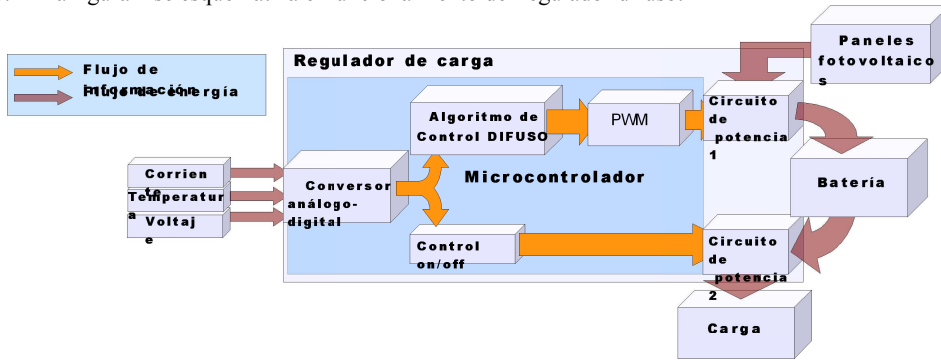


Figura 1: Esquema del flujo de energía e información dentro del Regulador de Carga Difuso.

El microcontrolador también se encarga de conectar por medio de una señales eléctrica el circuito que conecta el sistema Panel-Batería con la Carga y esto lo hace por medio de un control on/off, de manera que si hay carga almacenada se conecta la Batería a la Carga, en caso contrario, se desconecta.

## LÓGICA DIFUSA

Todo sistema de control basado en lógica difusa necesita 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 o Borrosificador, Evaluación de Reglas y el Defuzzyficador o Desborrosificador, como se indica en la figura 2 [Brío, 1997].

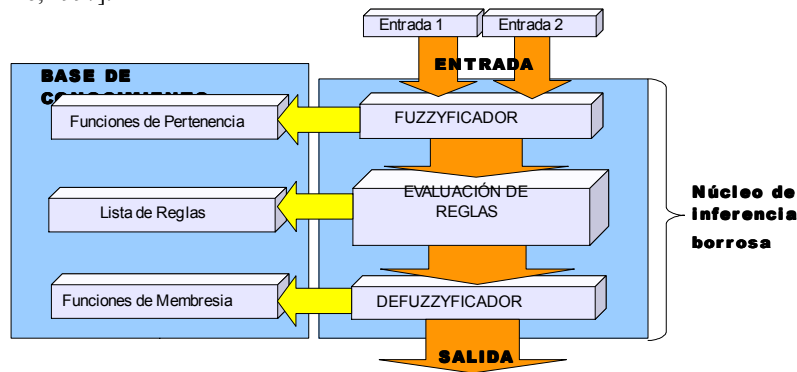


Figura 2: Esquema básico de un sistema Difuso.

Las variables que ingresan al Núcleo son valores de entrada no difuso, siendo estas las señales eléctricas que brindan información del sistema 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 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, por medio de una función denominada de membresía. En estos bloque se definen Funciones de pertenencia, una Lista de Reglas y funciones de Membresía, formando la Base de Conocimiento del un sistema.

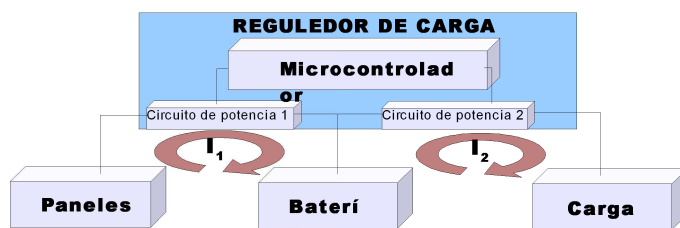


Figura 3: Flujos de corriente dentro del sistema fotovoltaico.

Debido a que los estados de carga de las baterías depende fuertemente de la tensión de bornes de la batería, la corriente que fluye en el sistema y la temperatura, se decidió definir tres conjuntos difusos de entrada en el sistema de control denominados, TENSIÓN, CORRIENTE y TEMPERATURA. Para trabajar con el conjunto de entrada CORRIENTE se necesita medir la corriente I1 e I2 que muestra la figura 3, el valor de corriente que se ingresa al núcleo de inferencia difusa es la resta de  $I_2 - I_1$ , de ésta forma se consigue trabajar solo con un conjunto. [Farfán, 2009].

Implementar en el regulador de carga un núcleo de inferencia difusa, trabajando con tres variables de entrada, nos lleva a definir un conjunto de reglas que relaciona la información difusa proveniente de los tres conjuntos de entrada. Manejar la información de tres conjuntos difusos con un conjunto de reglas, nos lleva a trabajar con un número elevado de reglas y se vuelve engorroso desarrollar el sistema de reglas y mucho más aun, ajustarlo. [FLEB, 2001].

Debido a esto se trabajo con un sistema difuso que contiene dos núcleo de inferencia, organizándose la lógica del regulador como muestra la figura 4.

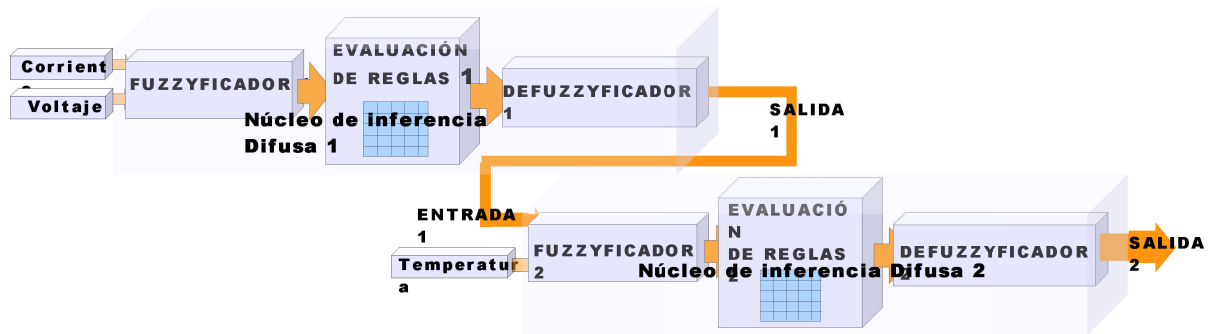


Figura 4: Esquema de la lógica de control de un regulador de carga con dos núcleo de inferencia.

En este esquema se observa dos bloques que representan cada núcleo de inferencia, donde dos de las tres variables de entrada ingresan al primer núcleo para ser fuzzyficadas, evaluadas por el primer conjunto de reglas y ésta información luego de ser defuzzyficada, se utiliza como entrada para el segundo núcleo junto a la tercera variable. En el segundo núcleo, las entradas deben ser fuzzyficadas, evaluadas por el segundo conjunto de reglas y ésta información luego de ser defuzzyficada, se relaciona con la modulación por ancho de pulso que maneja el bloque de potencia.

## MICROCONTROLADOR Y LÓGICA DIFUSA

Para la implementación del algoritmo difuso se utilizó un microcontrolador PIC 18F4550 debido a que encontramos entre sus características, distintos convertidores A/D de 10 bits, 32.768 bytes disponible para la memoria de programa (para poder incorporar el algoritmo de lógica difusa) y distintos puertos que pueden configurarse para la salida PWM. La programación del microcontrolador se realizó en lenguaje C por medio de MPLAB C18, un compilador de C para PICs de la familia 18 de microchip. Se utilizó este lenguaje de programación debido a que el algoritmo difuso necesita realizar distintos cálculos matemáticos que se simplifican en C, especialmente al Fuzzyficar la entrada de la señal obtenida de las conversiones A/D y al Defuzzyficar la salida.

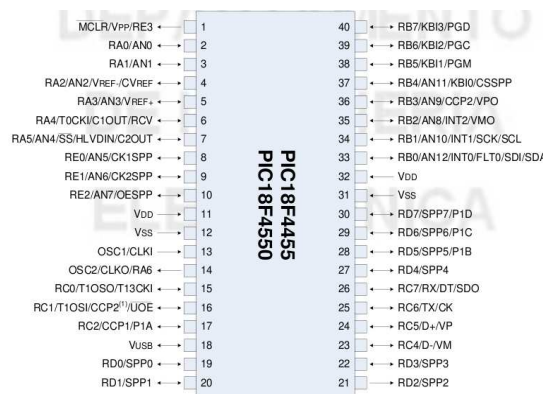


Figura 5: PIC 18F4550

En la figura 6 se esquematiza el diagrama de flujo del algoritmo incorporado al microcontrolador. Se observa que inicialmente se configuran los puertos de entrada y salida del microcontrolador. Se utilizó el puerto A para trabajar como entradas para la conversión A/D y el puerto C para la salida PWM. La configuración de las entradas y salidas se las realiza una vez, junto con el periodo de la señal de salida modulada. El algoritmo luego de la configuración, ingresa en un ciclo infinito, tomando la señal de cada convertidor e ingresándolos como entrada del algoritmo difuso. Una vez terminado el cálculo, se relaciona la salida del algoritmo con un número entero que ingresa a la función que modifica el ciclo de trabajo de la señal modulada, repitiéndose esto constantemente.

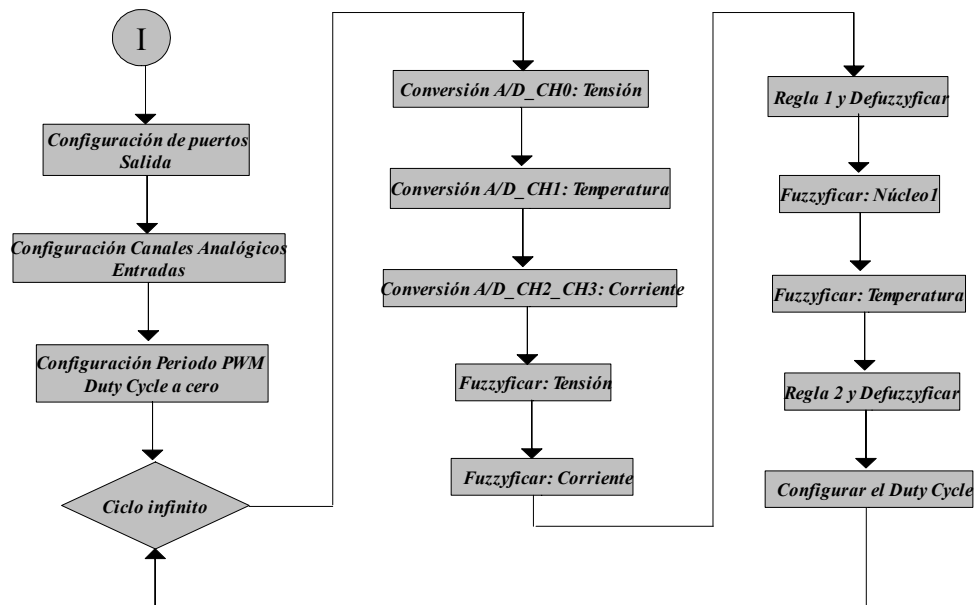


Figura 6: Diagrama de Flujo del Microcontrolador.

En la figura 7 se observa el plano de control o salida del algoritmo difuso, en función de la Tensión y Corriente. A medida que se modifica la Temperatura, se modifican las características de este. En la salida obtenemos un número real entre cero y dos, por lo tanto tenemos que transformar esta salida en un número natural que nos permita modificar la el ciclo de trabajo del PIC.

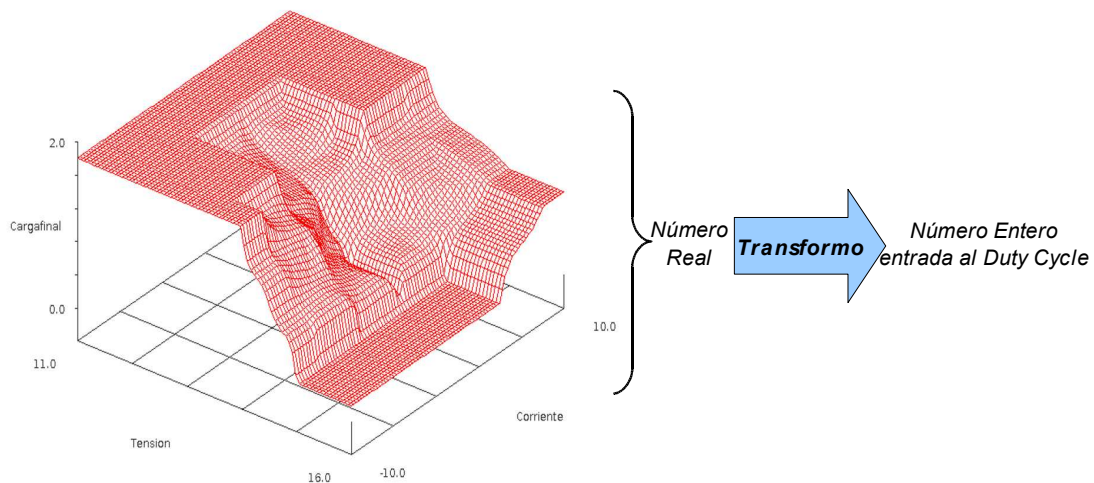


Figura 7: Plano de control del regulador.

### TOMA DE DATOS

Para analizar el comportamiento del algoritmo incorporado al microcontrolador, se utilizo un toma de datos. Este sistema se encuentra compuesto principalmente por cuatro ADC0832 serie de ocho bits manejados por una computadora por medio del puerto paralelo. Estos convertidores contienen dos canales para realizar las medidas, de manera que el sistema consta de ocho entradas de ocho bits. El circuito realizado para el manejo de los cuatro ADC requiere de cuatro señales del puerto paralelo por cada convertidor, de manera tal que se utilizaron los tres registros del puerto paralelo, el DATAPORT y el CONTROLPORT para la configuración de los distintos canales de los cuatro ADC, y el STATUSPORT para recibir las señales de cada conversión. En la imagen de figura 8 se puede observar la conexión de este.

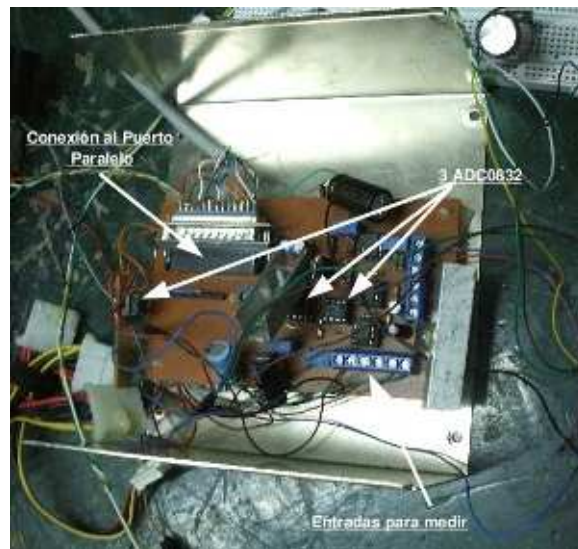


Figura 8: Placa toma de datos desarrollada.

Los conversores ADC0832 trabajan junto a un programa realizado en lenguaje C manejado por un sistema operativo LINUX, que nos permite sincronizar la conversión de cada uno de los canales, convertir la señal digital en la magnitud analógica que se está midiendo, guardar esta información en distintos archivos y por medio de tuberías, redireccionar el contenido de los archivos como entradas de un programa denominado GNUPLOT que nos permite mostrar la información medida. El programa por cada canal, mide cien veces y promedia, de forma que nos permita achicar el error de cada medida que guarda. Esto es conveniente debido a que el ADC puede trabajar a una frecuencia máxima de 2 Mhz.

En los ensayos el toma de datos y el microcontrolador con el algoritmo difuso trabajan en forma conjunta, el microcontrolador toma los datos del sistema, los procesa y en función de estos manda una señal modulada que regula la corriente de entrada de la batería, mientras que el dispositivo toma de datos guarda la misma información que el microcontrolador en una PC.

#### ELEMENTOS PARA MEDIR LAS MAGNITUDES DE ENTRADA

El microcontrolador actúa en función de la variación de las magnitudes que influyen en la carga de una batería, es por ello que se utilizaron algunos sensores para medirlas. Para tomar la temperatura ambiente se utilizó un sensor LM35, que entrega 10mV por grado centígrado. Esta señal ingresa a un amplificador que conecta su salida al ADC0832 y al microcontrolador.

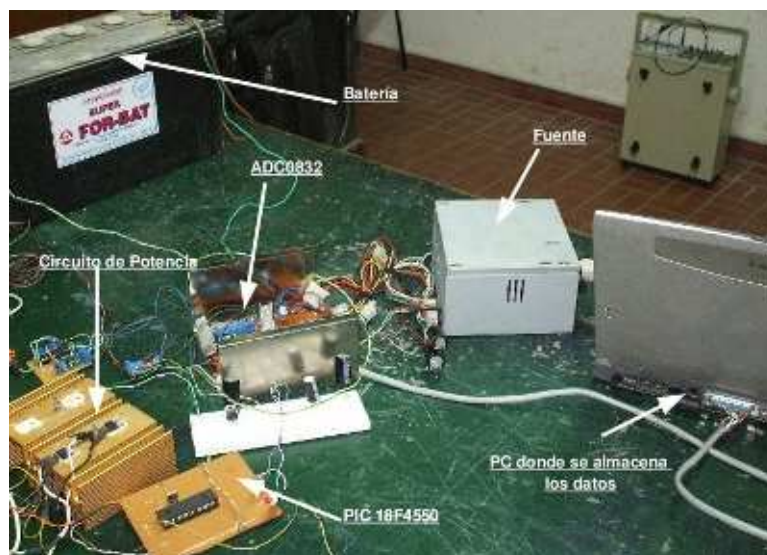


Figura 9: Sistema de medida implementado y placa del microcontrolador.

Si bien para el microcontrolador no es muy necesario la etapa amplificadora para tomar el dato del LM35, si lo necesita el ADC0832 ya que es de ocho bits. El toma de datos también guardo la información de la temperatura del electrolito, medida por medio otro LM35 encerrado en un tubo de vidrio pequeño rodeado de una grasa conductora. Esta señal no ingreso al microcontrolador, debido a que en una instalación solar autónoma no es sencillo tomar esta.

La corriente se midió por medio de un sensor de efecto Hall UGN3503UA, que en conjunto con un toroide permite medir la variación de corriente en función de la variación de campo magnético que produce el conductor por donde pasa la corriente que ingresa a la batería. El cable conductor se encuentra enrollado en un núcleo de hierro y en medio de este, se coloca el sensor como se observa en la figura 10. La señal que entregada por el sensor hall, se depura y amplifica utilizando un amplificador de instrumentación, de manera que la señal que ingresa a la entrada del ADC, si no hay corriente es cero. A medida que la corriente fluye por el toroide, la señal comienza a crecer.

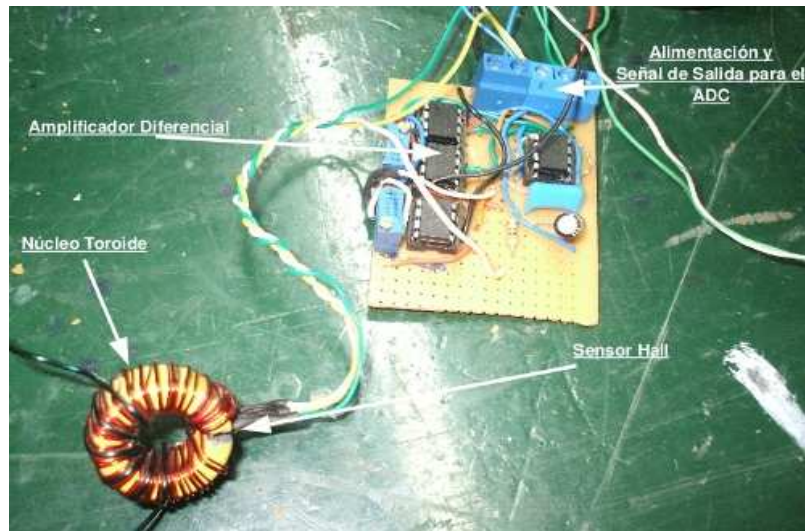


Figura 10: Sistema de medida de Corriente.

La tensión de bornes de la batería se midió simplemente por medio de un divisor de tensión, estabilizado por medio un capacitor electrolítico. El sistema toma de datos inicialmente se calibro y probo en ensayos de carga y descarga de baterías de plomo ácido. En la figura 11 se muestra la información guardada por el toma de datos en la carga de una batería de 100Ah, por medio de una corriente constante de 9A.

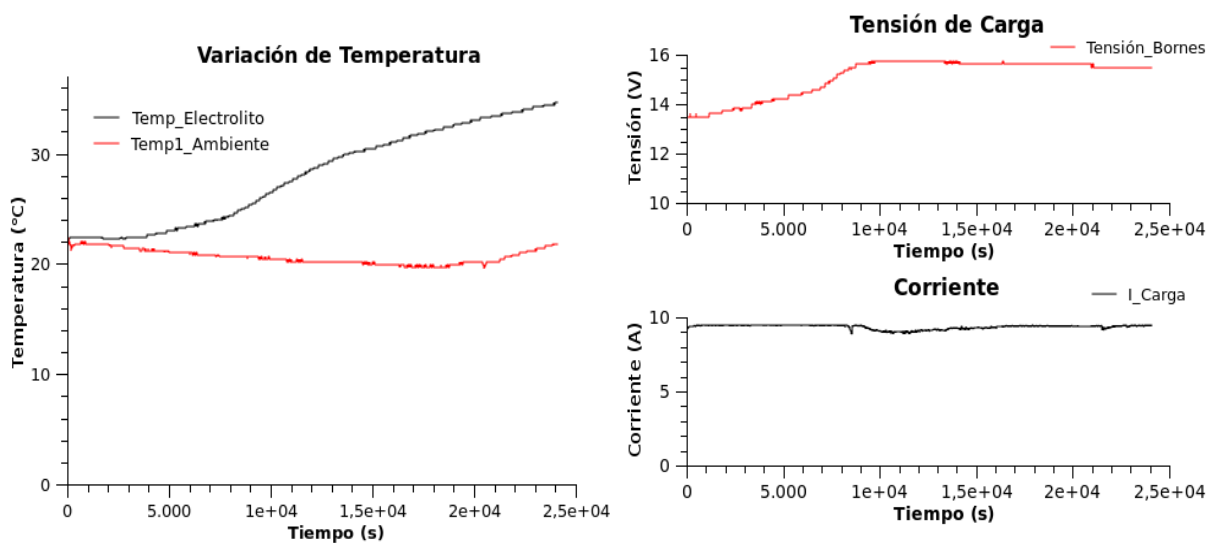


Figura 11: Ensayo de baterías de plomo ácido a corriente constante.

Luego de calibrar y ensayar el sistema de adquisición de datos, se utilizo el mismo para estudiar la respuesta del algoritmo de control difuso en el microcontrolador.

### ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO

En la figura 12a se observa la carga de una Batería de Plomo Ácido al inyectarle corriente. Esta batería de 100 Ah se conectó a tres paneles fotovoltaicos de 70W y la regulación de carga la realizó el regulador difuso. En la figura 12b se observa la variación de la temperatura en el momento posterior al corte de la carga y se observa una variación de solo 5 grados centígrados.

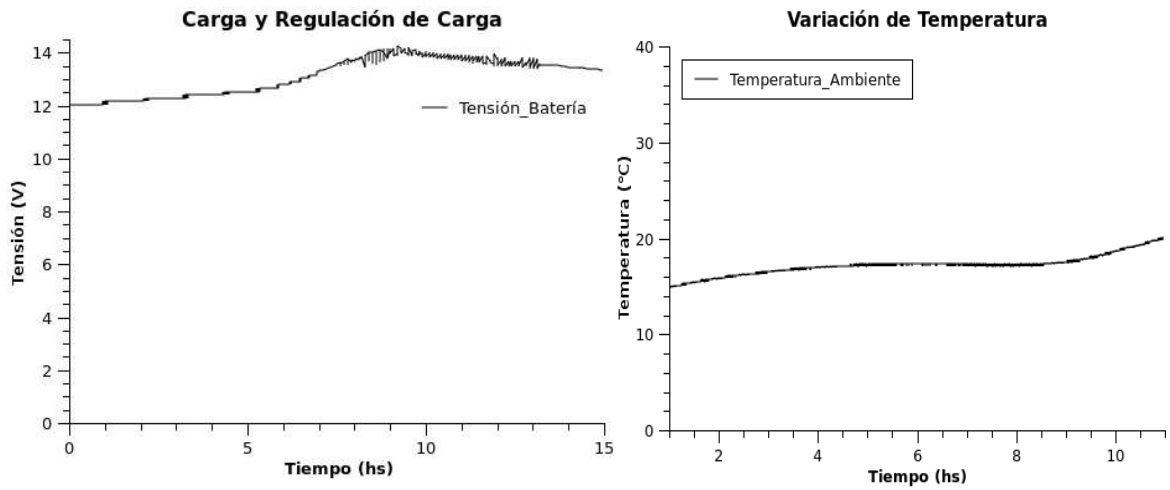


Figura 12: a) Regulación de la carga por medio de lógica difusa. b) Variación de la temperatura en el proceso de carga.

La batería inicialmente se encontraba descargada, midiéndose la densidad del electrolito para tener una estimación del estado de carga. De acuerdo a la medida de la densidad, se observó que el estado de carga inicialmente era del 40%. En el momento del inicio de la carga, la tensión de bornes era de unos 12V, mientras que la temperatura unos 15°C. En la figura 12a se observa el plano de control del sistema difuso y el punto de trabajo del regulador. El punto de trabajo inicial se encuentra en la zonas más altas del plano de control, significando que en la salida de microcontrolador es 5V, por lo tanto los paneles inyectan la máxima corriente que en ese momento pueden entregar. Si bien la corriente es baja, debido a que esto se realizó en horas de la mañana.

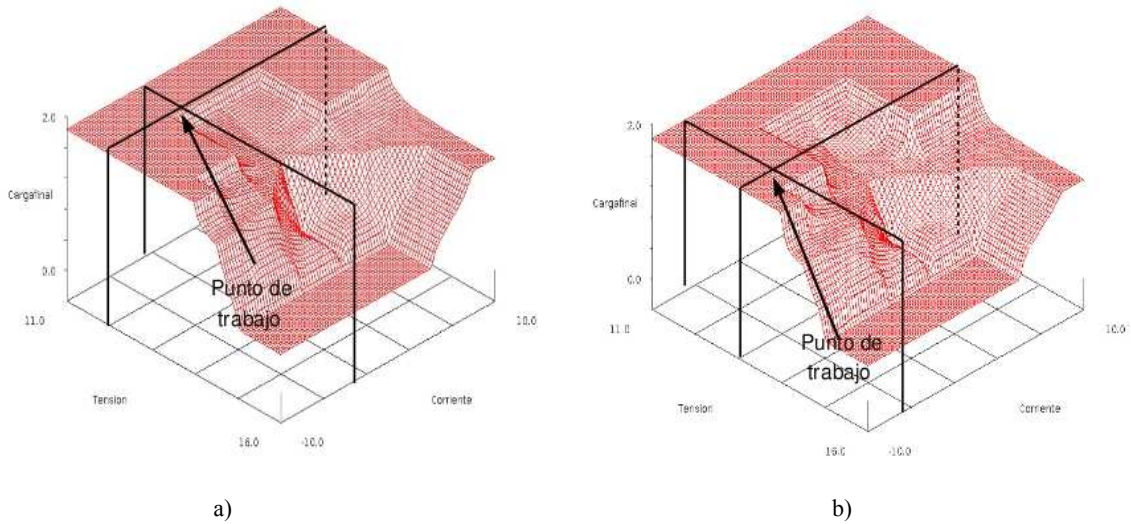


Figura 13: a) Plano de control del sistema difuso al inicio de la carga. b) Variación del punto de trabajo en la Carga.

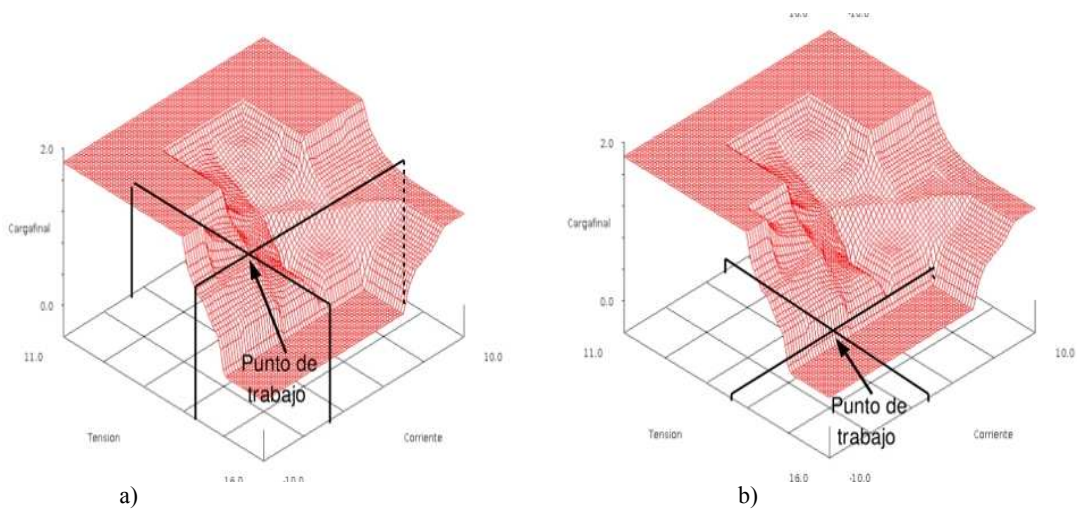


Figura 14: a) Punto de regulación de la carga. b) Punto de trabajo cercano al corte de la carga.

En la figura 12a se observa que seis horas más tarde la corriente que ingresa a la batería aumentó, sin embargo la señal sigue en estado alto, debido a la baja carga del acumulador como se observa en la figura 13b. En todo el proceso se observa que la variación de la temperatura no es elevada, por lo tanto no se observa variaciones significativas del plano de control.

A medida que se inyecta corriente en la carga, se observa en la figura 12a, que después de ocho horas de carga comienza la regulación. En ese momento el regulador de carga se encuentra trabajando en el punto que indica la figura 14a. Se observa que la señal es menor que la máxima del plano de control, de forma que en esta zona ya se encuentra regulando la carga el microcontrolador. En la figura 14b se observa el punto cercano al corte, donde puede apreciarse en la zona más baja del plano de control donde la señal es cero. Trabajar en la región del plano de control donde la señal es cero, produce en la salida del microcontrolador un cero, que ingresa al transistor NPN que maneja el MOSFET, cortando la carga.

## CONCLUSIÓN

En el trabajo pudo observarse una buena respuesta del sistema toma de datos, midiendo Tensión de bornes de la Batería, Corriente de Carga, Temperatura Ambiente y Temperatura de Electrolito. Si bien es un sistema sencillo, nos permitió monitorear la carga de baterías y estudiar un poco más el sistema acumulador.

Para el trabajo se estudio y se implemento un Amperímetro mediante sensores de efecto Hall, que se comportaron adecuadamente para corriente menores a los 10A, observándose a corrientes mayores, el calentamiento del conductor del toroide y por lo tanto del núcleo de hierro, afectando la señal del sensor. Esto debe mejorarse, redimensionándose.

En cuanto al regulador de carga difuso, se observó una adecuada regulación de corriente y en la mayoría de los casos medidos, con una carga final óptima. Se observó el comportamiento del conocimiento definido en el microcontrolador y se realizó un seguimiento de los puntos de trabajo en el plano de control en los procesos de carga. Este seguimiento permite estudiar la dinámica del algoritmo y encontrar las falencias del mismo.

Contar con un dispositivo de toma de datos con las características descritas y estudiar el comportamiento de un regulador de carga difuso implementado en un microcontrolador PIC, permitirá en el futuro mejorar la lógica de control, incorporar en el microcontrolador otros sistemas de control difuso como los del tipo Takagi-Sugeno o estudiar la evolución del conocimiento mediante técnicas como la de gradiente descendente. El desarrollo de estos sistemas de control permitirá contar con sistemas solares controlados por medio de sistemas adaptativos.

## REFERENCIAS

- Bermúdez A., Barriga A., Baturone I., Sánchez-Solano S. (2001). FLEB (Fuzzy Logic EBook) Libro Electrónico sobre Lógica Difusa, Valencia.
- Copetti JB, Chenlo F, Lorenzo E. (1993). A general battery model for PV system simulation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*; 1: 283–292.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª edición Wiley Interscience.
- Escolano Ruiz F., Cazorla Quevedo M.A., (2003). *Inteligencia Artificial*, pp. 74-89 Thompson, Madrid.
- Farfán R.F., Hoyos D., Montero M. (2009). Ajuste de la base de conocimiento de reguladores de carga difusos y comparación de su respuesta con un sistema de regulación convencional, *ASADES Vol 13*, 4.145-4.152.
- Farfán R.F., Hoyos D. (2009). Comportamiento del plano de control de reguladores de carga difusos para sistema fotovoltaico implementando uno y dos núcleos de inferencia, *ASADES Vol 13*, 4.29-4.36.
- Gasquet H.L., (2004). *Conversion de la Luz Solar en Energía Eléctrica. Manual Teórico y Práctico sobre los Sistemas Fotovoltaicos*, Solartronic.
- Gasquet H.L. (2007). *Manual sobre los sistemas fotovoltaicos*, El Paso Solar Energy Association, pp. 67-78, Austin Texas.
- Guasch D. y Silvestre S. (2003). *Dynamic Battery Model for Photovoltaic Applications* 11:193–206 (DOI: 10.1002/pip.480) Universitat Politècnica de Catalunya.
- Lorenzo E. (1994). *Electricidad Solar, Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos*, 1ª edición, pp. 121-163, PROGENSA Sevilla.
- Martín del Brío B. , Sanz Moina A. (1997). *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. 1ª edición, pp. 243-281, RA-MA Madrid.

## ABSTRACT

In this paper we evaluate the behavior of a control algorithm, incorporated into a PIC microcontroller that acts as the brain of a photovoltaic regulator. This algorithm was designed using fuzzy logic and the study was conducted to monitor the control plane using the system in charge of lead acid batteries. To develop a fuzzy control system, information is needed to control behavior of the system and dump this information into the knowledge base. This knowledge is acquired of the battery models and control logic development using a software program called Xfuzzy 3.0 [Farfán, 2009]. For this work we use the PIC 18F4550 and evaluated the performance of fuzzy controller using a data collection connected to a PC, to be monitored from the control plane to observe the behavior of the algorithm.

**Key word:** photovoltaic, regulator, batterie, fuzzy logic.