



Implementación de un control difuso de un motor DC en un microcontrolador Atmega328p

*Fernando Gudiño Peñaloza**

RESUMEN

El presente trabajo presenta el modelado y simulación de un prototipo didáctico de un controlador difuso tipo Mamdani, implementado con un microcontrolador ATmega328p. La finalidad del prototipo es el control de un conjunto motor-generador de corriente directa, con control por armadura. Para ello se decide implementar un controlador difuso que replique el comportamiento de un controlador tipo Proporcional-Integrativo. La arquitectura seleccionada es clásica dentro de los sistemas de control difuso al utilizar inferencia MAX-MIN para la inferencia y agregación de los conjuntos difusos, además se utilizan particiones triangulares y trapezoidales para reducir la carga computacional y se utiliza el método de centroide para garantizar un proceso de reconversión a la salida preciso. Los resultados son consistentes y favorables para su implementación en físico lo que garantiza el correcto funcionamiento del prototipo.

ABSTRACT

This paper presents the modeling and simulation of a didactic prototype of a Mamdani-type fuzzy controller, implemented with an ATmega328p microcontroller. The purpose of the prototype is the control of a direct current motor-generator set, with armature control. For this, it is decided to implement a fuzzy controller that replicates the behavior of a Proportional-Integrative type controller. The selected architecture is classic within fuzzy control systems by using MAX-MIN inference for the inference and aggregation of fuzzy sets, in addition triangular and trapezoidal partitions are used to reduce the computational load and the centroid method is used to guarantee a conversion process to the precise output. The results are consistent and favorable for its physical implementation, which guarantees the correct functioning of the prototype.

Palabras claves: Lógica Difusa, Control Inteligente, motor-generador, modelado.

INTRODUCCIÓN

Un controlador difuso, también conocido como controlador difuso o controlador fuzzy, es un tipo de controlador utilizado en sistemas de control basados en la lógica difusa. A diferencia de los controladores clásicos, que utilizan reglas de control precisas y matemáticas, los controladores difusos utilizan reglas lingüísticas y

conceptos de incertidumbre para manejar sistemas complejos o ambiguos (Lee, 1990).

El controlador difuso se basa en el principio de la lógica difusa, que permite representar y manejar la imprecisión y la incertidumbre en un sistema. En lugar de emplear valores numéricos precisos, los controladores difusos utilizan conjuntos difusos y funciones de pertenencia para describir las variables de entrada y salida del sistema. Estas funciones de pertenencia asignan grados de membresía a los valores de entrada y salida, lo que permite una representación más flexible y menos rígida (KICKERT & MAMDANI, 1993).

Los controladores difusos son utilizados en una amplia gama de aplicaciones en las que se requiere un control robusto y adaptable, especialmente en sistemas complejos o donde la descripción precisa del sistema es difícil de obtener. Ejemplos de aplicaciones incluyen el control de velocidad de motores, sistemas de climatización, control de tráfico, sistemas de navegación y muchos otros (TANAKA & WERNERS, 1997).

Un prototipo didáctico es un modelo o representación simplificada de un objeto, sistema o concepto que se utiliza con fines educativos y de aprendizaje. Estos prototipos están diseñados específicamente para facilitar la comprensión y el estudio de un tema en particular.

Por otra parte los prototipos didácticos suelen ser herramientas interactivas y tangibles que permiten a los estudiantes experimentar y manipular objetos o conceptos de manera práctica. Pueden estar compuestos por materiales físicos, como maquetas, modelos a escala, simuladores o kits de experimentación, o pueden ser implementados en forma de aplicaciones o programas de computadora. La función principal de un prototipo didáctico es brindar una experiencia de aprendizaje práctica y concreta (POLO, NARVAEZ, & ROBLES ALGARÍN, 2018).

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un prototipo de un controlador difuso tipo Mamdani, dispositivo de bajo costo con un microcontrolador ATmega328p (ALLDATASHEETS, 2023).

El prototipo fue diseñado como un apoyo para el aprendizaje teórico y práctico en el área de control para estudiantes de la licenciatura en ingeniería en Telecomunicaciones, sistemas y electrónica, permitiéndoles probar el desempeño individual de cada una de las etapas que componen los módulos.

*FES-C, Departamento de Ingeniería,
fernando.gudino@comunidad.unam.mx





ANTECEDENTES

El proceso de control en un controlador difuso involucra tres etapas principales tal como se observa en la figura :

Fuzzificación: Las variables de entrada se convierten en conjuntos difusos mediante funciones de pertenencia, lo que permite representar la incertidumbre y la imprecisión de los datos de entrada.

Inferencia: Se aplican reglas lingüísticas basadas en la lógica difusa para determinar la salida del controlador. Estas reglas describen la relación entre las variables de entrada y salida del sistema. La inferencia borrosa utiliza operaciones de lógica difusa, como la implicación borrosa (generalmente mediante el uso del modus ponens), para combinar y evaluar las reglas.

Defuzzificación: La salida borrosa obtenida en la etapa de inferencia se convierte en un valor numérico preciso mediante técnicas de defuzzificación. Estas técnicas, como el centroide o el máximo de la función de pertenencia, permiten obtener un valor concreto para la salida del controlador.

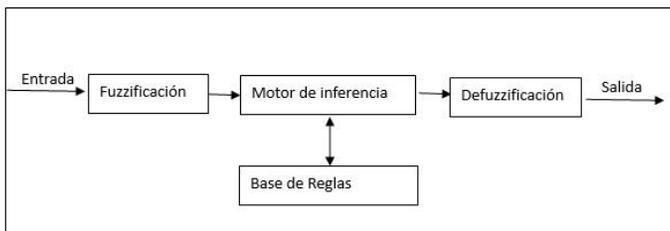


Figura 1.-Arquitectura Básica de un controlador difuso

En general, una regla de control difuso es una relación difusa que se expresa como una implicación difusa. En lógica difusa, hay muchas maneras en que una implicación difusa puede ser definido. La definición de una implicación borrosa puede ser expresada como una función de implicación difusa. El algoritmo de control difuso utilizado en este proyecto se basa en los dos conceptos de la implicación difusa y la regla de inferencia composicional, definidos como:

La función de pertenencia de una implicación borrosa S: si A entonces B, dado el conjunto difuso A del universo de discurso X y el conjunto difuso B de Y, está definido por

$$\mu_S(y, x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad x \in X; y \in Y \quad (1)$$

Dada una implicación difusa S: si A entonces B, el conjunto difuso B' inferido por un cierto (dado) conjunto difuso A', donde A y A' son conjuntos difusos del universo del discurso X, mientras que B y B' son conjuntos difusos de Y, tiene una función de pertenencia definida por

$$\mu_{B'}(y) = \max_x \min[\mu_{A'}(x), \mu_S(x, y)] \quad x \in X; y \in Y \quad (2)$$

Esto se llama la regla de inferencia composicional (ZADEH, 1978). Sobre la base de estas dos definiciones se puede representar en un sentido matemático exacto un sistema que es meramente descrito por un conjunto de reglas lingüísticas, tales como:

Si entrada= "grande" entonces salida= "pequeña"

O(de otra forma)

Si entrada= "mediana" entonces salida= "mediana"

Las cuales son las reglas de producción contenidas en la ase de reglas y que determinan el comportamiento del controlador.

MODELO DEL PROTOTIPO

A continuación se describe el diseño e implementación de un controlador difuso de velocidad, equivalente a un controlador PI, para un sistema motor-generador de corriente directa. La planta consta de dos motores iguales de 12 voltios acoplados mecánicamente.

El primer paso para diseñar un sistema de control, es determinar el comportamiento dinámico de la planta a controlar, es decir, conocer su modelo teórico, en este caso, la F.T. de un motor de DC controlado por armadura.

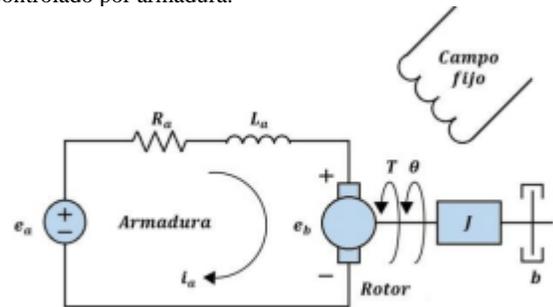


Figura 2.-Esquema de control por armadura, (Nise, 2004)

$$\frac{\theta(s)}{E_\alpha(s)} = \frac{k}{s[(R_\alpha + L_\alpha s)(Js + b) + Kk_b]} \quad (3)$$

La ecuación anterior es el modelo matemático establecido en la literatura, (OGATA, 2010). De manera experimental se determino que le modelo se puede representar por la siguiente función de transferencia.

$$P(s) = \frac{\theta(s)}{E_\alpha(s)} = \frac{22/43}{0.03s + 1} \quad (4)$$

La cual es equivalente al elemento del generador al utilizar dos elementos de similares características



ELEMENTOS DE CONTROL Y ACTUADORES DEL PROTOTIPO

El controlador se ha implementado sobre un microcontrolador MCF51QE128 de ATMEL® haciendo uso de la tarjeta de desarrollo ARDUINO.

El actuador del motor está formado por un circuito de potencia regulado mediante una señal PWM generada desde el microcontrolador, como se muestra en la figura 3. El control de potencia se realiza con un circuito conmutado (MOSFET), que se dispara por un circuito conformado por dos transistores bipolares complementarios en configuración Totem-Pole y un tercer transistor para efectuar el corte-saturación de dicha red.

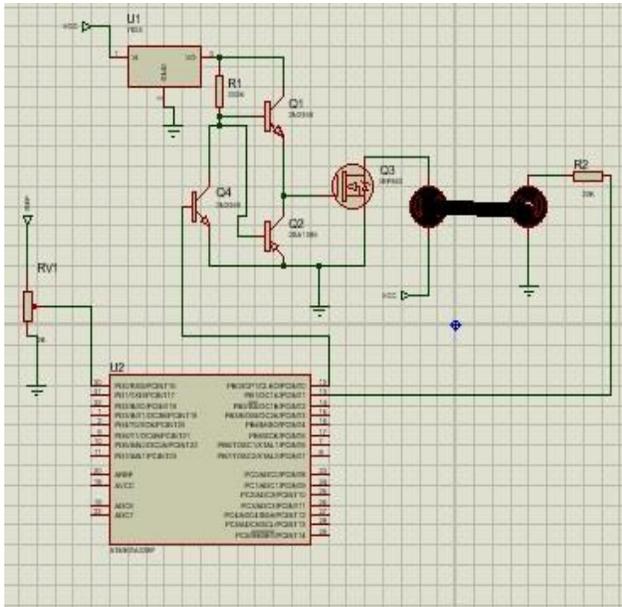


Figura 3.-Prototipo implementado, esquema electro-mecánico

La señal de entrada al microcontrolador consiste en un voltaje analógico que llega a un ADC de 10 bits, el error, que corresponde a la entrada al controlador difuso, es la diferencia entre el valor del ADC y la referencia, que para el ejercicio se logra con otra entrada ADC que se conecta con el potenciómetro.

La otra entrada del controlador es el integrador, que simplemente es la suma acumulativa de los valores de error, el rango se ha establecido entre -4096 a 4096 equivalentes a 4 muestras consecutivas con la entrada en el rango mínimo-máximo de error.

Para la salida se hará uso de una señal PWM cuyo rango equivale al porcentaje de ciclo útil (0% a 100%) establecida por una función de 10 bits (rango 0 a 1023).

DISEÑO DEL CONTROLADOR

Para el diseño del controlador se tomaron en cuenta las variables del sistema (entradas de salida) y se decidió utilizar las siguientes consideraciones

Funciones de Pertenencia (etapa de Fuzzificación)

Las variables difusas se definen asignando valores de un grado de pertenencia a los conjuntos difusos para cada elemento del universo de discurso. Existen varios tipos de función pertenencia, para este ejercicio se han usado las dos más sencillas y comunes, las funciones triangular y trapezoidal. en la figura 4 se muestra la forma de las funciones de pertenencia. Se han definido 3 conjuntos como error positivo (EP), error negativo (EN) y error cercano a cero (C) para la entrada error y tres salidas: small, médium y big,

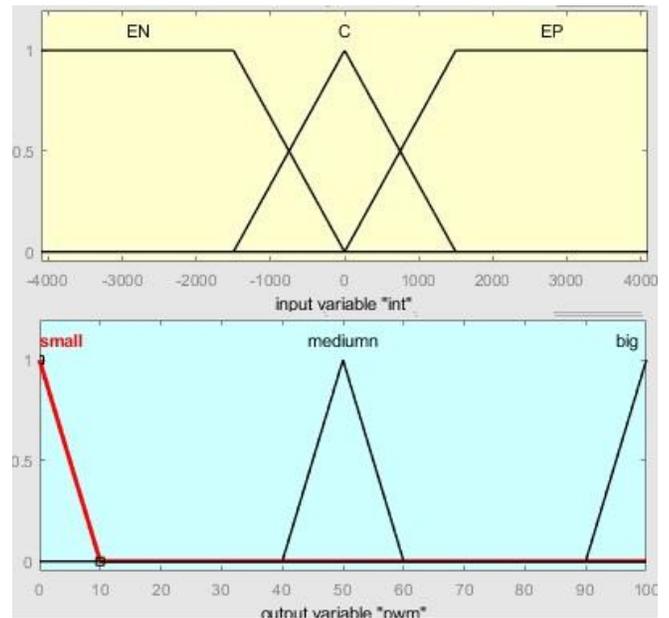


Figura 4.- funciones de pertenencia para las variables del sistema en la etapa de fuzzificación

Base de reglas y Mecanismo de inferencia

El mecanismo de inferencia difuso realiza la etapa de inferencia en el proceso de control difuso. Esta etapa implica combinar las reglas difusas basadas en la lógica difusa y determinar la salida del controlador difuso. En este proyecto se utiliza un sistema de inferencia de tipo MAMDANI el cual es un Modelo basado en Agregación de Medidas Difusas de Activación utilizando Normas de Implicación de Zadeh (ZADEH, 1978).

Dicho sistema utiliza la implicación difusa con operador mínimo, ec (1) y determina la salida en el proceso de agregación con el operador máximo, ec(2). El conjunto de reglas difusas puede ser expresado mediante una matriz de asociación difusa, FAM (Ponce, 2010).

La información de la memoria asociativa se puede observar en la tabla 1



Tabla 1.- memoria asociativa difusa para el control de un motor de cd por pulsos PWM

Entrada(error)	EN	C	EP
Salida (PWM)	SMALL	MEDIUM	BIG

De igual manera se definen una segunda matriz en la cual se toma en cuenta la acumulación de los errores en 4 ciclos de muestras y se entregan a la parte que genera la parte integrativa del sistema, dado que la tabla anterior es para la parte proporcional únicamente. La información se ve en la tabla 2

Tabla 1.- memoria asociativa difusa para el error acumulado compensado por la parte integrativa

Entrada(error acumulativo)	EN	C	EP
Salida (PWM)	SMALL	MEDIUM	BIG

Como se observa se reutiliza la memoria asociativa anterior con la finalidad de reducir los cálculos en el sistema.

La matriz expresada en las tablas 1 y 2 se puede traducir de la siguiente manera :

Si el error es negativo(EN) entonces la salida debe ser SMALL.

Lo que significa que el pulso PWM entregado tiene un ciclo de trabajo pequeño

Método de defuzzificación

El paso final de un controlador difuso es la reconversión de una salida en términos de conjuntos difusos a un valor numérico, en el dominio de los reales, que pueda ser implementado por el sistema.

Del conjunto de técnicas existentes, SOM, LOM, MOM, Bisector , Centroide, etcétera se selecciona la de centroide. Si bien las otras técnicas son computacionalmente menos demandantes, no garantizan una salida correcta del sistema. Se define entonces a la salida y_d como

$$y_d = \frac{\int_S y \mu_y(y) dy}{\int_S \mu_y(y) dy} \quad (5)$$

Donde μ_y es la función de pertenencia del conjunto de salida Y, cuya variable de salida es y. S es el dominio o rango de integración

SIMULACION Y RESULTADOS

Para comprobar su funcionamiento el sistema antes de su implementación se simuló en Matlab© y se comprobó que el sistema funciona de manera adecuada. Los resultados de la simulación se observan en las figuras 5 y 6.

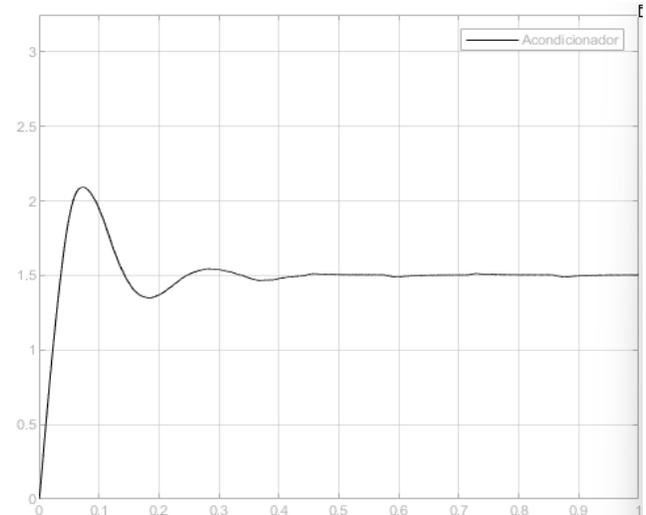


Figura 5.- Respuesta temporal del prototipo, a un entrada de error de -106(5.45 V)

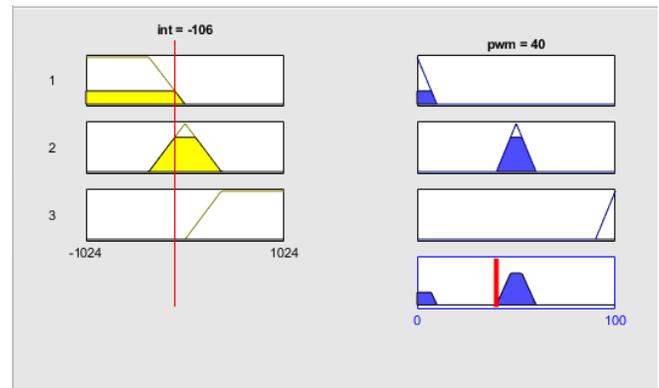


Figura 6 Ejemplo de entrada y salida del controlador difuso del prototipo para un entrada de -106(5.45V) se obtiene un ciclo de trabajo del PWM de 40%

Agradecimientos.

Este proyecto fue realizado gracias al apoyo de PIAPIME PE105123 Y PAPIIT IA102323



CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Las simulaciones demuestran que el prototipo propuesto es funcional y que su implementación en físico es viable. La respuesta temporal del sistema es adecuada y el tiempo de resolución del sistema es casi instantáneo.

El prototipo hasta el momento no se ha implementado de forma física, sin embargo es parte de los proyectos en desarrollo del departamento de ingeniería de la FES Cuautitlán. Los resultados finales y su evaluación por parte de los estudiantes estarán a finales de 2023.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- ALLDATASHEETS. (20 de 05 de 2023). all data sheets. Obtenido de <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/241077/ATMEL/ATMEGA328P.html>
- KICKERT, W. J., & MAMDANI, E. H. (1993). Analysis of a fuzzy logic controller. *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*, 290-297.
- Lee, C.-C. (1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 20(2), 404-418.
- Nise, N. (2004). *Control Systems Engineering*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- OGATA, K. e. (2010). *Ingeniería de control moderna*. NJ: Prentice hall.
- POLO, A., NARVAEZ, P., & ROBLES ALGARÍN, C. (2018). Implementation of a cost-effective didactic prototype for the acquisition of biomedical signals. *Electronics*, 7(5), 77.
- Ponce, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Alpha Editorial.
- TANAKA, K., & WERNERS, B. (1997). *An introduction to fuzzy logic for practical applications*. Tokio: Springer.
- ZADEH, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, 1(1), 3-28.

INFORMACIÓN ACADÉMICA

Fernando Gudiño Peñaloza: Ingeniero Mecánico Electricista egresado de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM, Maestro en Ciencias de la Computación egresado del Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey y Doctor en Ciencia Computacionales por dicho instituto. Su campo de especialización es Inteligencia artificial y Computo Evolutivo.

