

# Aplicación del *control difuso* al diseño e implementación del módulo de potencia de un robot móvil

Eric Vallejo Rodríguez\*, Fernando Méndez\*\*, Carlos Ochoa\*\*\*  
Laboratorio de Robótica de la Universidad del Norte

---

## Resumen

*El módulo de potencia de un robot móvil, que consiste en el sistema de movimiento provisto por un par de motores de DC, fue diseñado e implementado utilizando un algoritmo de control difuso dentro de un microcontrolador. La variable que se debía controlar fue la velocidad, el diseño se llevó cabo por medio de la realización de las tres etapas de inferencia difusa definidas para estos controladores. La implementación, desde el punto de vista de hardware, requirió la utilización de microcontroladores y técnicas como la medición de velocidad con encoders y la generación de señales PWM. El estudio permitió definir las características relevantes que permiten al control difuso realizar su labor de forma eficiente, establecer esquemas de diseño adecuados para una aplicación de este tipo, así como los mínimos requerimientos hardware para llevar a cabo un diseño de control difuso.*

**Palabras claves:** Control difuso, módulo de potencia, robot móvil, PWM.

## Abstract

*The mobile robot power module, that consists of the system of movement provided by a pair of DC motors, was made using an algorithm of fuzzy control within a microcontroller. The variable to control was the speed. The design took end through the three defined stages of fuzzy inference for these controllers. The implementation, from the point of view of hardware, required the use of microcontroller and techniques like the speed measurement with encoders and the PWM signals generation. The study let to define the more important characteristic that do to the fuzzy control efficient, build design schemes appropriated, so the minimum requirement hardware for a fuzzy control design.*

**Key words:** Fuzzy control, power module, mobile robot, PWM.

Fecha de recepción: 29 de marzo de 2001

---

\* Profesor de Microprocesadores I y II. Coordinador del grupo de Robótica Móvil. (evallejo@uninorte.edu.co).

\*\* Estudiante de ultimo semestre de Ingeniería Electrónica; miembro del grupo de Automatización y Robótica.

\*\*\* Estudiante de ultimo semestre de Ingeniería Electrónica; miembro del grupo de Automatización y Robótica.

## INTRODUCCIÓN

La teoría de control ha encontrado en el modelamiento matemático de la planta la herramienta fundamental para resolver las dificultades que se presentan a su paso; sin embargo, esta tarea no siempre es fácil, y en algunos casos ni siquiera es posible. Debido a ello se ha recurrido a formas alternativas para inferir una respuesta adecuada ante diferentes tipos de entradas a un sistema. Es así como se penetra en campos como la inteligencia artificial, y más exactamente en la Lógica Difusa.

El control difuso, convertido en la aplicación más exitosa de la lógica difusa, presenta características de diseño y comportamiento que han llevado a un rápido desarrollo y estudio del mismo. La mejor forma de entender y analizar estas características se encuentra en el desarrollo de una aplicación donde se puedan apreciar los aspectos de interés y el proceso que envuelve este tipo de controlador.

Para la realización de dicha aplicación se utilizó como planta un motor de DC de imán permanente, sobre el cual se realizaría una labor de control de velocidad. El sistema completo estará constituido por un par de motores de DC que se encontrarán trabajando dentro de una plataforma, la cual conformará el módulo de potencia y constituirá la base de la estructura para un robot móvil sobre la que se desarrollarán e implementarán otras aplicaciones que vinculen distintos campos de la inteligencia artificial u otros proyectos basados en la exploración de desarrollos tecnológicos compatibles.

### Control difuso

El control difuso o control por lógica difusa tuvo su origen en 1965 cuando Lofti A. Zadeh planteó la teoría de conjuntos difusos. Desde ese entonces se han realizado numerosos estudios y aplicaciones que han llevado a un rápido progreso de esta teoría, la cual ha encontrado en el control automático uno de sus campos de mayor desarrollo.

Al igual que cualquier otro sistema de control, el control por lógica difusa trabaja sobre un estado deseado o *setpoint*, establece el valor requerido del sistema por medio de una variable medida y lleva a cabo su tarea sobre una variable controlada.

La diferencia entre un sistema de control convencional y uno que utiliza lógica difusa se encuentra en la forma de realizar el proceso de inferencia del valor de salida. En un controlador difuso, esta respuesta se calcula por medio de un algoritmo difuso en el cual se encuentran comprendidas una serie de etapas encargadas de determinar la respuesta adecuada.

Los sistemas de inferencia difusa se basan en el lenguaje natural o cotidiano, condición ésta que les permite realizar una clasificación de la información más que una cuantificación; el proceso de inferencia de este tipo de sistemas vincula en un alto grado el sentido común y el conocimiento del experto codificados en forma de reglas heurísticas que determinarán las acciones de control.

### Conjuntos difusos

Como ya se mencionó, los sistemas de control difuso se basan en la teoría de conjuntos difusos. Para entender el concepto de conjunto difuso es conveniente recordar el concepto clásico de conjunto, el cual se define como una agrupación de elementos donde la pertenencia de cada uno de ellos se puede expresar como una función que relaciona dicho elemento con los valores de salida 1 y 0.

$$F : X \rightarrow \{0,1\}$$

Por otro lado, los conjuntos difusos aceptan más de dos posibles valores para la pertenencia de un elemento, y establecen como valores de salida los comprendidos en el intervalo  $[0, 1]$ .

$$\nu_p : X \rightarrow [0,1]$$

Así, la pertenencia a un conjunto está dada por una función conocida como *función de pertenencia o membresía* y que establece el grado de pertenencia de dicho elemento al conjunto que lo contiene.

Los conjuntos difusos son apropiados para expresar conceptos en los que resulta imposible realizar una afirmación absoluta sobre un hecho, como por ejemplo: la velocidad es alta. De esta forma, la lógica difusa utiliza variables lingüísticas, que no son más que conceptos expresados en términos de conjuntos difusos (ver figura 1).

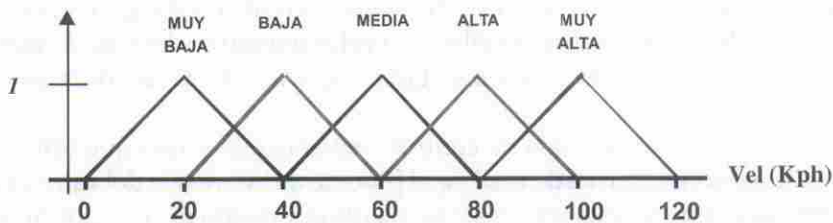


Figura 1. Variable lingüística *velocidad*

Además, la teoría de conjuntos difusos provee una serie de operaciones y relaciones que permiten llevar a cabo afirmaciones más complejas, hasta el punto de poder realizar reglas de decisión aplicables a procesos de inferencia.

### Diseño de controladores difusos

El proceso de diseño de controladores difusos está dividido en tres etapas fundamentales:

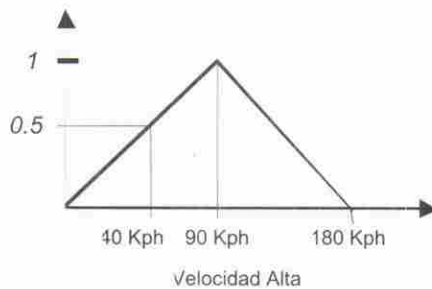
1. Fusificación
2. Implicación
3. Defusificación

El funcionamiento de un controlador difuso sigue el orden presente en las etapas mencionadas, de tal forma que el resultado a la salida de cada una de ellas depende exclusivamente de los valores encontrados en la etapa inmediatamente anterior.

- *Fusificación*

En esta etapa del proceso se realiza la traducción de la variable medida al lenguaje del controlador. Así, el valor encontrado será expresado en términos del conjunto difuso y su grado de pertenencia al mismo (ver figura 2).

Un mismo valor puede pertenecer a varios conjuntos, si éstos se encuentran traslapados, lo que dará como resultado que se entreguen múltiples valores de pertenencia para cada variable medida, además es posible que se esté trabajando con más de una variable.



**Figura 2.** Velocidad Alta

Para realizar el diseño de esta etapa se deben tener en cuenta varios factores, tales como:

- El universo de discurso o rango de trabajo sobre el cual operan los conjuntos difusos debe contener todos los valores posibles de la variable medida en el sistema.
- Los conjuntos difusos pueden aceptar muchas formas; sin embargo, para escoger la más conveniente se debe tomar aquella que permita representar con mayor precisión el comportamiento del sistema y que al mismo tiempo pueda ser descrita a través de los dispositivos *hardware* utilizados de la forma menos compleja.
- La posición y forma de los conjuntos debe estar en relación directa con el conocimiento adquirido del proceso, de tal manera que la información expresada por cada conjunto represente, con la mayor fidelidad posible, el comportamiento del sistema.

- **Implicación**

La *implicación* define la etapa del controlador donde se evalúan las reglas de inferencia difusa con el fin de dar una respuesta adecuada del sistema ante los valores presentes.

Para la elaboración de las reglas se toman en cuenta cada una de las situaciones posibles, lo que lleva a inferir una respuesta para cada caso. El resultado de la inferencia difusa es una variable lingüística en la cual la forma de sus conjuntos difusos, además de haber sido definida previamente, es el resultado de relacionar la salida de cada regla con el conjunto asociado a su respuesta. El proceso de diseño de esta etapa requiere:

- Definir la variable lingüística de salida (variable controlada) determinando las características de sus conjuntos de la misma forma que se hizo con los conjuntos de entrada.
- Elaborar una base de conocimientos que permita determinar las acciones adecuadas del controlador en forma de reglas.
- Elaborar el conjunto de reglas de control que determinarán el comportamiento del sistema; dichas reglas tendrán la estructura:

Si  $X$  y  $Y$ , entonces  $Z$

Donde  $X$  y  $Y$  son los conjuntos difusos a la entrada, para el caso de dos variables, y  $Z$  son los conjuntos de salida. Un ejemplo de estas reglas puede ser: *Si la temperatura es alta y la presión es media, entonces el voltaje es alto.*

Por último, es posible que más de una regla actúe sobre un mismo conjunto, en cuyo caso se utilizará un criterio apropiado para escoger el valor. Comúnmente se utiliza el método del valor máximo para decidir la pertenencia que se debe usar.

- *Defusificación*

La respuesta de la evaluación de las reglas difusas se encuentra contenida en el conjunto de salida, y está dada por los valores de pertenencia asignados a cada conjunto que determinan una nueva forma para cada uno de ellos. En este punto se tiene la respuesta del controlador en términos de cada conjunto de salida. Sin embargo, es necesario obtener un único valor de salida y que se encuentre en términos numéricos.

Para obtener la respuesta deseada se debe llevar a cabo un proceso inverso a la fusificación, conocido como *defusificación*. Para realizar esta tarea existen varios métodos, pero ninguno se considera más apropiado que otro, por lo cual se deja al usuario la decisión sobre su elección de acuerdo con los requerimientos que exige el sistema. Algunos métodos normalmente usados para la defusificación son los siguientes:

- Centro de área
- Centro de máximos
- Primero de máximos

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA

El *módulo de potencia* tiene como fin controlar la velocidad y el sentido de giro de dos motores de DC acoplados a una estructura mecánica y que funcionan como sistema motriz por medio de ruedas, obedeciendo a las órdenes de movimiento generadas en una etapa superior. Se puede apreciar que el sistema tiene como consigna dos aspectos fundamentales: El primero es un diseño con lógica difusa, y el segundo, conformar la etapa de potencia de una plataforma móvil enmarcada dentro de un proyecto escalable.

El sistema está conformado por una estructura mecánica construida en un plástico de gran resistencia sobre el cual se acoplaron dos motores de dc de imán permanente que generan el movimiento de las ruedas de la plataforma. Además, posee una tercera rueda que funciona como apoyo a la estructura (ver figura 3).

Sobre la plataforma se encuentran dos tarjetas electrónicas. La primera, que denominamos principal, en la que encontramos el sistema de control general imple-

mentado en un microcontrolador y el circuito de potencia de los motores. La segunda tarjeta tiene como fin la interacción con el usuario, y en ella encontramos un *display* de cristal líquido para la visualización de las variables de interés y un teclado, en el cual el usuario puede simular las órdenes de movimiento que deberán ser entregadas por la etapa superior.

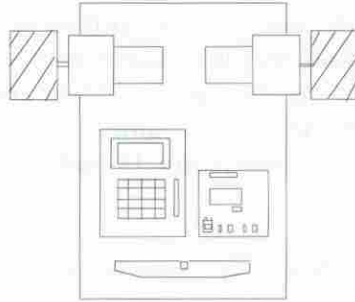


Figura 3. Plataforma móvil

### Diagrama de Bloques del Sistema

A grandes rasgos, el sistema se divide en varios bloques funcionales, entre los que encontramos: El de control conformado por el microcontrolador principal, que tiene a su cargo el manejo del sistema en general. El bloque de potencia, constituido por los manejadores de los dos motores o *drivers*. Dos bloques de medición conformados por los *encoders* y que tienen como función la medición de la velocidad de los motores, y por último el bloque de interfaz, compuesto por un teclado y un *display* de cristal líquido, cuya función principal es demostrativa (ver figura 4).

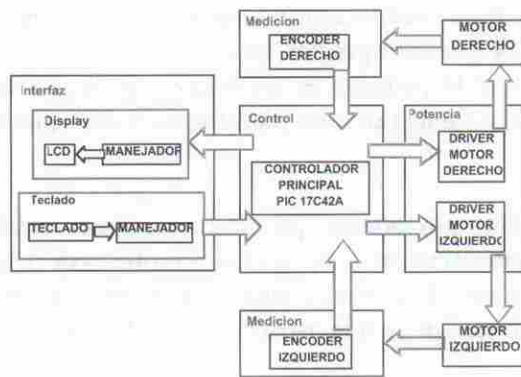


Figura 4. Diagrama de bloques

## Diseño

El sistema cuenta con un microcontrolador de la familia *Microchip*, el PIC17C42A, que resulta ideal para la aplicación, ya que cuenta con instrucciones de comparación, posee dos módulos PWM, con los cuales se puede variar la velocidad a los motores y multiplicación por *hardware*, que reduce considerablemente el tiempo de ejecución del programa, entre otras características sobresalientes.

Los motores que se deben utilizar en la plataforma son de corriente continua de imán permanente y poseen caja de reducción. Entre sus rasgos más importantes tenemos: un gran torque, corriente de consumo y velocidad relativamente bajas, condiciones ideales para ser usados en una plataforma móvil trabajando con una fuente de alimentación portátil.

El manejo de los motores hace necesario que se disponga de un circuito integrado, con el fin de cambiar el sentido de giro y que funcione como interfaz para el manejo de potencia entre el microcontrolador y los motores; por ello se usó el IC L298, que posee internamente dos puentes H (uno para cada motor) y la circuitería necesaria para tal fin. A este integrado lo llamaremos de ahora en adelante *Driver* o manejador de motores.

Debido a que se quiere controlar la velocidad de giro de los motores, se necesita de un medio capaz de variarla usando niveles lógicos TTL, por lo cual se recurrió a la técnica de modulación por ancho de pulso o PWM, en la cual se emplea una onda de frecuencia constante a la que se le varía el ciclo útil o tiempo en alto para generar un voltaje promedio que se aplica a los motores a través de su manejador.

La medición de la velocidad de los motores se realiza mediante un *encoder* que genera un tren de pulsos con una frecuencia proporcional a la velocidad de giro del motor. Está conformado por un disco ranurado acoplado al eje principal del motor y un sensor óptico compuesto por un diodo infrarrojo y un fototransistor trabajando en las zonas de corte y saturación generadas por la presencia o ausencia de ranura, que permite o no el paso de la señal del diodo IR al fototransistor.

La velocidad se calcula contando por medio de los *Timer/Counter* del microcontrolador el número de flancos que genera el *encoder* en una ventana de tiempo, lo que es equivalente a medir la frecuencia de esta señal.

Para efectos demostrativos se hizo necesario contar con dispositivos de interfaz de usuario, de forma tal que se pudiera comprobar el funcionamiento del sistema observando las velocidades de los motores, los sentidos de giro y los *setpoints* en un



*display* de cristal líquido, y además se debía tener la capacidad de generar órdenes de velocidad y sentido de giro para los motores, por lo que se incorporó un teclado para tal fin.

Debido a que se quiere ejercer control de velocidad sobre los motores, las variables de interés para el sistema estarán dadas por el error de velocidad, el cual estará determinado por la diferencia entre el *setpoint* y el valor real de velocidad, y el cambio del error o aceleración del sistema, que consiste en la diferencia entre el error presente y el error anterior.

El controlador difuso ha sido implementado por *software* en el microcontrolador principal, y está formado por tres programas o etapas de suma importancia llamadas Fusificación, Implicación y Defusificación, que fueron construidas en forma de subrutinas.

- **Fusificación**

Para el desarrollo de esta etapa es necesario definir la forma de los conjuntos borrosos, su extensión y el número de ellos. Se escogieron conjuntos borrosos que fueran de fácil modelación matemática, como lo son los triángulos y trapecios, que pueden ser representados por ecuaciones de la forma  $Y=m*x+b$ . El universo del discurso para estos conjuntos depende de la medición de velocidad, la cual presenta 128 niveles, de 0 hasta 127; por lo tanto, se emplea un rango entre -127 a 127 para las variables de entrada al microcontrolador, que corresponden al máximo error de velocidad y a la máxima diferencia del error para sus valores positivos y negativos. Además, se estableció un número impar (5) de conjuntos borrosos ubicados de tal forma que se tuviera simetría para reducir en lo posible el número de cálculos que se debía realizar.

Esta subrutina inicialmente mediante instrucciones de comparación determina para un valor de la variable de entrada cuáles son los conjuntos borrosos a los que pertenece, para luego evaluar la pertenencia a cada uno de los conjuntos usando la ecuación  $Y=m*x+b$  que los describe.

Los conjuntos borrosos de las variables de entrada los podemos apreciar en la siguiente figura:

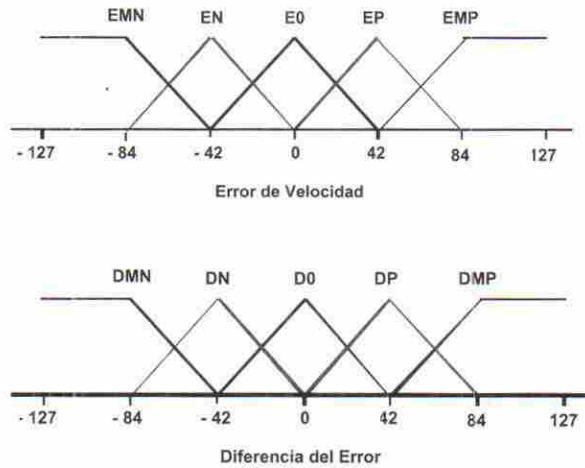


Figura 5. Conjuntos borrosos de las variables de entrada

- *Implicación*

En esta etapa se evalúan, mediante instrucciones de comparación, las reglas del controlador que se elaboraron con base en la combinación de todos los estados posibles de las variables de entrada por medio de reglas del tipo:

- SI X y Y, ENTONCES Z

Ejemplo: **SI el error es *Alto* y la diferencia de error es *Media*,  
Entonces la acción de control es *Grande***

Tomando como consecuentes los conjuntos difusos que determinan la acción de control y que representan el valor del ciclo útil o ancho de pulso de la señal PWM que ha de ser sumado o restado a su valor presente.

Las reglas se asignaron de la siguiente manera:

	DMN	DN	DO	DP	DMP
EMN	P1	P1	P1	P2	P3
EN	P2	P2	P2	P2	P2
E0	P2	P2	P3	P4	P4
EP	P4	P4	P4	P4	P4
EMP	P3	P4	P5	P5	P5

Las reglas se elaboraron de acuerdo con el comportamiento observado en la planta a través de un proceso de estudio realizado durante el transcurso del proyecto.

Para la elaboración de cada una se estableció como criterio de diseño que la regla respondiera de manera consecuente con la variable crítica, que en este caso era el *error de velocidad*, y tomando la información provista por la variable adicional para aquellos casos en los que hubiera evidencia de la ocurrencia de un evento futuro o cuando el valor presente en la misma fuera relativamente muy superior al de la variable crítica.

- **Defusificación**

Para llevar a cabo la defusificación de la variable de salida se empleó un método cuya caracterización matemática pudiera ser representada en el microcontrolador de la forma menos compleja posible. Además este método debía proveer variaciones suaves de los valores obtenidos; por estas razones se escogió El *Centro de Máximos* para la defusificación.

La evaluación de esta operación se lleva a cabo por medio de la siguiente expresión:

$$t_0 = \frac{\sum_i [I \times \max_i(L) \times \arg(\max_i(L))]}{\sum_i I}$$

Con este cálculo se efectúa una media ponderada de los valores máximos de cada conjunto difuso pesados por el valor inferido por medio de las reglas. Este proceso es llevado a cabo por medio de un conjunto de sumas, multiplicaciones y divisiones que implican trabajar con valores en 8, 16 y hasta 24 bits, en busca de la mayor precisión posible.

Gracias a la disposición de los conjuntos difusos y a los valores de los mismos por medio de la defusificación, no sólo se evalúa la magnitud de la acción de control sino también el signo asociado a ella.

### **Programa principal**

El programa principal obtiene los *setpoints* de velocidad y sentido de giro para determinar el ancho de pulso que se va a entregar a los motores de acuerdo con el valor inferido por el controlador difuso, de forma tal que conserve la velocidad consignada establecida.

## CONCLUSIONES

La *lógica difusa* representa una herramienta de gran importancia cuando se tiene que controlar un sistema no lineal con una representación matemática compleja y se puede implementar usando dispositivos electrónicos de bajo costo, como es el caso de los microcontroladores.

Al escoger la forma de los *conjuntos borrosos* y el *método de defusificación*, es de especial importancia que sean de una representación matemática realizable y eficiente, mediante un algoritmo, para facilitar los cálculos que se deben efectuar con el microcontrolador, lo cual disminuye el tiempo de ejecución del programa.

El conjunto de reglas que dominan el comportamiento de un controlador difuso se basa en el conocimiento del experto y resultan de suma importancia al momento de evaluar la respuesta del controlador.

Un *sistema no lineal* se convierte en el ambiente ideal para demostrar el funcionamiento de un controlador difuso, gracias a la capacidad que éste tiene para responder a un amplio rango de situaciones.

## Bibliografía

- HABER, Rodolfo. *Introducción al control difuso (curso)*. Cali, Centro de Investigaciones Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, 1995. 55p.
- REYERO Raúl. *Sistemas de control basados en lógica borrosa*. España, Omron electronics, 1995. 104 p.
- NARVÁEZ, Juan. *Diseño de un controlador borroso para el manejo de motores de imán permanente*, 1999. 95 p.
- EMINOGLUS, I. «The effects of the number of rules on the output of a fuzzy logic controller employed to a PM d.c. motor». En: *Computer & Electrical Engineering*, N° 24, 1998, p. 245-261.
- ESPADA, A. «Robust stability of fuzzy control system based on cognicity conditions». En: *Automática*, N° 35, 1999, p. 643-654.
- GUILLEMIN, P. «An approach to motor control with fuzzy logic». *Sgs Thomson Microelectronics Application Note*, 1993, <http://st.com/stoneline/books/ascii/docs/2077.htm>. Marzo/2000.