

## Comparación del control de velocidad de un motor de DC utilizando lógica difusa vs PID tradicional

Jorge Eliécer Hernández Palacio, Ingeniero Electrónico U. de A., Docente U. de A.  
 John Alonso Monsalve Jaramillo, Ingeniero-Especialista U. de A., Docente I.T.P.B., Instructor SENA  
 Edgar Mario Rico Mesa, Ingeniero Electrónico U. de A., Docente U. de A. – I.T.P.B.  
 Grupo GEPAR (Grupo de Electrónica de Potencia, Automatización y Robótica), U. de A.

### Resumen

*En este artículo se mostrarán las etapas a seguir para la implementación de un control de velocidad utilizando lógica difusa y se comparará con el control tradicional (PID). Utilizando el microcontrolador motorola 6808GP32 conversor DC/DC (Chopper).*

**Palabras Clave:** Control difuso, Control PID, Sistemas Embebidos, Lógica Difusa, Teoría de Control.

### Abstract

*In this article the stages will be shown to continue for the implementation of a control of speed using diffuse logic and it was compared with the traditional control (PID). Using the microcontrolador motorola 6808GP32 converter DC/DC (Chopper).*

**Key Words:** Fuzzy control, Control PID, Embedded Systems, Fuzzy Logic, Theory of Control.

## I. INTRODUCCIÓN

El control de velocidad de un motor DC es un buen escenario para buscar las diferencias y las semejanzas entre los controladores y sus respectivas teorías, cabe anotar que el control difuso se ha aplicado a través de simulaciones en el ámbito nacional pero se ha puesto en práctica en otros países.

Las etapas que conforman el control fuzzy son: fuzzificación, máquina de inferencia y la defuzzificación, en este artículo se describen cada una de las etapas que se deben tener en cuenta, para poder ejercer un control fuzzy, y a la vez se muestran los pasos para manejar un controlador PID tales como parametrización del sistema, creación del modelo del sistema, cálculo de los parámetros del controlador PID, también se mostrarán algunas subrutinas hechas en lenguaje ensamblador claves en el funcionamiento del controlador.

## II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

Para el control de velocidad de un motor DC se utilizó como herramienta un microcontrolador 6808GP32 de motorola y se implementó un controlador de lógica

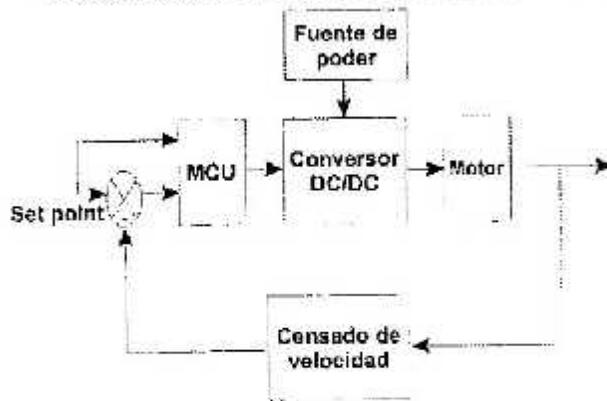
difusa, el cual toma una serie de decisiones cada 500 ms para el control óptimo del motor, produciendo una orden de salida del microcontrolador (PWM) hacia la etapa de potencia (conversor DC/DC), donde controlará el voltaje de armadura y devolverá la energía a la fuente primaria, según sea la orden, el ciclo de dureza controla el flujo de potencia entregado a la máquina y por consiguiente su velocidad, dado que se tiene realmente una inductancia fija de armadura se obtiene una corriente máxima de armadura.

Para la alimentación del motor se utilizó un voltaje de campo de 100 Vdc y un voltaje de armadura de 70 Vdc, la velocidad del motor es de 1800 r.p.m.

A fin de mantener constante la velocidad deberá de manera continua variarse el voltaje de armadura o en su defecto la corriente de armadura para estabilizar el PAR GENERADO, para lo cual deberá modificarse el ángulo de disparo en los rectificadores controlados o el ciclo de dureza en CHOPPERS.

Para establecer la velocidad se deberá variar el ancho de pulso del PWM que será amplificado por el CHOPPERS que maneja al motor.

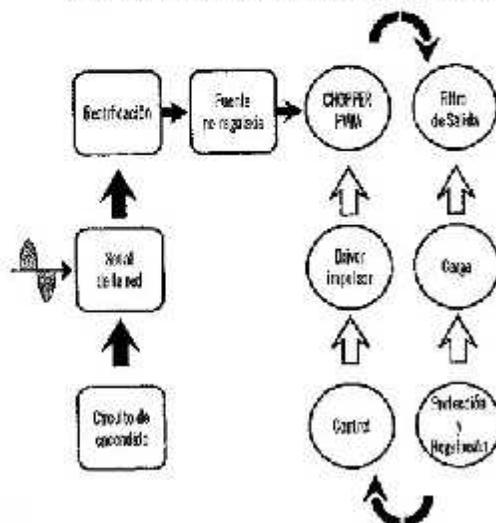
## DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA



## Descripción del Hardware

Se utilizó como elemento primario (lazo de realimentación) un sensor de infrarrojo que produce pulsos que son cuya cantidad en un periodo de tiempo es equivalente a la velocidad del motor, también se empleó el input capture del MCU que chequea los pulsos provenientes del sensor y los convierte a r.p.m., se utilizó un PWM variable para excitar el motor de tal forma que llegue a la velocidad deseada, se empleó un driver el cual está formado por dos etapas: un circuito integrado ULN2803 encargado de amplificar los valores digitales a valores analógicos de 15 voltios, y una segunda etapa formada por un CHOPPER (conversor DC/DC), el cual recibe la información del microcontrolador para hacer que el transistor de potencia dispare según el dato de la tarjeta de control que está polarizada a 15 voltios.

## DIAGRAMA DE BLOQUES DEL HARDWARE



Los convertidores DC/DC mediante CHOPPERS permiten disponer de diversos valores de tensión de salida. Constan de una etapa de alimentación por una tensión de entrada no estabilizada con un margen de variación, una etapa de conmutación (PWM) variando el ciclo de trabajo y una etapa de salida con un filtro LC. Una de las aplicaciones es el control de velocidad.

## III. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL

En los últimos años ha tomado fuerza la implementación del control fuzzy en la solución de problemas de diversa índole y de gran complejidad, buscando la mayor eficiencia posible y la menor pérdida de energía en el sistema. Para dar una idea sobre su mecánica, a continuación se tratará la estructura de un sistema de control difuso básico: El control por medio de lógica difusa consta de cuatro etapas:

## A. FUZZIFICACIÓN

Consiste en clasificar una variable física de acuerdo al conocimiento que se tenga sobre su comportamiento, dicha clasificación es cualitativa y está representada por áreas en forma triangular y trapezoidal, los nombres que se le asignan a dichas áreas representan las variables lingüísticas, la altura que poseen dichas áreas es denominada función de pertenencia(m) y varía de 0 a 1 ó de 0 a 255 etc. Esto depende del diseñador del sistema. Y el ancho corresponde a los valores numéricos de la variable física, ver figura 1 y figura 2.

## B. CONJUNTO DE REGLAS

Las reglas son un conjunto de parámetros (relacionados con una variable física que permitirá ejercer el control sobre el sistema) los cuales plasman el conocimiento que posee el diseñador sobre el proceso que se quiere controlar, y nos indican las decisiones más óptimas, con las cuales el sistema tenderá a estabilizarse, de acuerdo al estado actual de las variables que ya han sido fuzzificadas. Por ejemplo:

**Tecnología**

- Si la velocidad deseada es alta y el error es positivo, entonces el motor deberá aumentar su velocidad.
- Si la temperatura deseada es baja y el error es negativo, entonces la calefacción debe disminuir la temperatura.

**C. MAQUINA DE INFERENCIA**

Es el proceso mediante el cual se realizan los cálculos destinados a hallar un valor determinado (peso), lo cual se logra aplicando los conceptos correspondientes a las operaciones con conjuntos difusos (tales como max, min, producto, suma), cuya interpretación depende de la intención del diseñador. En esta etapa se obtienen los pesos más adecuados que indicarán la decisión a tomar.

**D. DEFUZZIFICACIÓN**

Consiste en clasificar la variable física de acuerdo a la forma como se quiere controlar la planta, es decir, según el criterio del diseñador; la clasificación se hace en forma cualitativa, a cada variable lingüística se le asigna un área en forma triangular o trapezoidal, la altura de las áreas o la función de pertenencia varían de 0 a 1 o de 0 a 255. A través de esta etapa, se busca traducir los pesos (valores que corresponden a la función de pertenencia) a términos de la variable física que se está manipulando; ver figura 3.

Después de esta breve introducción sobre algunos conceptos que son necesarios para entender la implementación de un control fuzzy en cualquier sistema, se comenzará a hacer una descripción sobre el programa desarrollado:

**IV. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

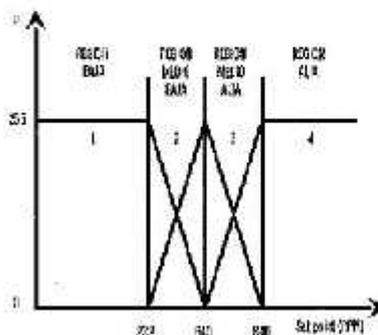
Se implementó un algoritmo de control con lógica difusa, conformado por dos entradas y una salida. Cada entrada está constituida por tres conjuntos difusos (regiones), dentro de los cuales se utilizó para la fuzzificación dos trapezios y un triángulo, buscando los valores más óptimos para cada región según las características del motor. Figura 1

**A. DESCRIPCIÓN DE LA FUZZYFICACIÓN**

La entrada uno corresponde al set point cuyas regiones son baja, medio, alto pero en el proyecto estas a su vez se clasificaron según la posición del dato en los conjuntos así: baja, medio baja, medio alta y alta como

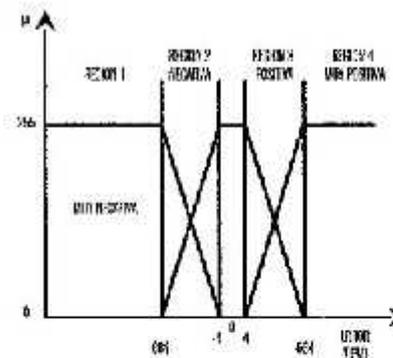
se ve en la figura 1. La fuzzificación de la entrada uno se basó en la comparación del valor entrado por el usuario (set point) y los límites impuestos a las diferentes regiones, para así identificar el(los) conjunto(s) en que se encuentra.

Figura 1. Fuzzificación del set point



La entrada dos corresponde al error (valor deseado - valor actual) cuyas regiones son negativo, cero, positivo y estas también se dividieron según la posición del dato en las regiones de la siguiente forma: muy negativo, negativo, cero, positivo y muy positivo como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Fuzzificación del error



La fuzzificación de la entrada dos se basó en las comparaciones del singleton (valor de la variable física) del error con los límites de las diferentes regiones buscando la clasificación del dato.

**Descripción del algoritmo de la fuzzyfización:** se implementan una serie de subrutinas correspondientes a las regiones que han sido determinadas y que fueron mencionadas anteriormente. En cada subrutina se clasifica el set point y el error, asignando a la vez los pesos correspondientes, lo cual se logra utilizando las ecuaciones de las rectas que conforman los triángulos

y trapecios (regiones difusas), con la siguiente expresión:  $y = mx + b$ :

$x$ : es la variable física que representa el estado actual del sistema.

$m$ : Pendiente de las rectas (valor que se puede cambiar buscando la sintonización del sistema)

$b$ : Intercepto de la recta con el eje y trasladado « $m$ » (función de pertenencia).

$y$ : Es el resultado de la ecuación que corresponderá al peso, que se le asigna a la variable de entrada. Dicho valor oscilará entre 0 y 255 para nuestro caso.

Tabla 1. Conjunto de reglas

Las reglas implementadas fueron las siguientes:

ERRORES	SET POINT		
	BAJO	MEDIO	ALTO
NEGATIVO	Pequeñas disminuciones	Medianas disminuciones	Grandes disminuciones
CERO	Mantener	Mantener	Mantener
POSITIVO	Pequeños aumentos	Medianos aumentos	Grandes aumentos

Ahora se muestra la subrutina

```

fuzent1reg2:
  ldx #0
  lda set_point
  cmp #ent1_bajo
  blo sal2
  cmp #ent1_medio
  lbs sal2
  mov #2t, numregal
  sub #ent1_bajo
  ldx #ent1_pen1
  psba ;algoritmo de la ecuación de
  mul; la recta: y=3.5x e y=255-3.5x
  sta peso1; para entrada 1
  pula
  psba
  ldx #ent1_frac_pen1_reg2
  div
  add peso1
  sta peso2
  lda #255t
  sub peso2
  sta peso1
  pula
  sal2: rts
  
```

## B. DESCRIPCIÓN DEL CONJUNTO DE REGLAS

Luego de fuzzificar las variables físicas de entrada, se procederá a chequear el conjunto de reglas, con las reglas activadas se busca encontrar la decisión más óptima. Cada regla está conformada por dos partes:

**El antecedente:** corresponde a las regiones donde se encuentran las variables físicas.

**El consecuente:** corresponde a la región donde se encuentra la decisión tomada. Esta implicación depende del conocimiento que posea el diseñador sobre el funcionamiento del sistema. Por ejemplo:

Tabla 2. Configuración de las reglas



ANTECEDENTE	CONSECUENTE
Si el set point es bajo y el error es negativo $\mu_{B \wedge N}$	El motor debe tener pequeñas disminuciones de velocidad $\mu_D$
En forma matemática es: $\mu_{B \wedge N} \rightarrow D$	
Si el error es 0 y sin importar el set point $\mu_{Z \wedge X}$	El motor debe mantener la velocidad actual $\mu_M$
En forma matemática es: $\mu_{Z \wedge X} \rightarrow M$	
Si el set point es alto y el error es positivo $\mu_{A \wedge P}$	El motor debe tener grandes aumentos de velocidad $\mu_A$
En forma matemática es: $\mu_{A \wedge P} \rightarrow A$	

**Descripción del algoritmo para el conjunto de reglas:** Las reglas se activan en la fuzzificación por ejemplo para la entrada uno. `mov #2t, num regla 1` y según el valor que almacena con 1, determinó que reglas se cumplen para dicha entrada, de igual manera sucede para la entrada dos.

Para detectar las reglas activadas se procede a hacer comparaciones en varias rutinas, en las cuales se afectan unas banderas o variables determinadas las cuales indicarán la decisión a tomar.

**Tecnología**

```

;chequeo si las entradas están en regiones
extremas
chequeo1regla:
    lda #1
    cmp numregla1
    bne sgtel
    cmp numregla2
    bne sgtel
    mov #ancho_pul_max, o1
sgtel:   rts
;chequeo si las entradas están en las
regiones 2 y 3
chequeo4regla22:
    lda #2
    cmp numregla1
    bne sgte301
    cmp numregla2
    bne sgte301
    bset disminuir, reg_ctr
;bandera que me indica que se activa la
regla cuyo antecedente corresponde a
set point bajo y error negativo
    bset C4_reglas, reg_control;
bandera que indica que se activan
cuatro reglas.
sgte301: rts
    
```

**V. MÁQUINA DE INFERENCIA**

Después de validar el conjunto de reglas vamos a la etapa máquina de inferencia, donde se realizan una serie de operaciones con las reglas que se han activado, para ello se emplean conceptos propios de la lógica difusa. Veamos como son las operaciones de los conjuntos difusos y donde se aplican operaciones a los antecedentes de las reglas:

$Max[Min(peso1(error), peso1(set point)), Min(peso1(error), peso2(set point))]$ .

De lo anterior empleando 2 de las reglas mostradas en el tema anterior se tiene la siguiente descripción matemática:

Sean  $a'$  y  $a''$  entradas del set point y error  
 $(a'x) \cap (B \cap N \rightarrow D) \cup (a''x) \cap (M \cap N \rightarrow D)$  equivale a:  
 $sup(a' * B) * sup(a'' * M) * \mu D \cup sup(a' * M) * sup(a'' * N) * \mu D$  ó  
 $Max[Min(a' * \mu B, a'' * \mu N) * \mu D, Min(a' * \mu M, a'' * \mu N) * \mu D]$ .

Cuando se utiliza la operación «min» entre dos conjuntos difusos significa la comparación entre los

pesos de dichos conjuntos buscando el valor menor entre los dos pesos.

Cuando se utiliza la operación max entre dos conjuntos difusos significa la comparación de los pesos de ambas regiones tratando de hallar el valor mayor entre los dos pesos. Como se observa en la siguiente subrutina.

$Min[peso2(set point), peso3(error)]$

```

resulregla2:
    lda peso2
    cmp peso3
    blo sgte23
    lda peso3
    sta pesofinal2
    jmp sgte24
sgte23:  lda peso2
    sta pesofinal2
sgte24:  rts
    
```

También se tiene la siguiente subrutina

```

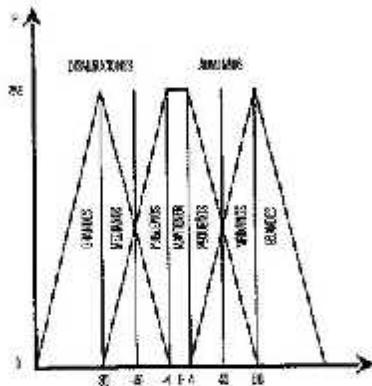
;max(pesofinal1,pesofinal2)
resulregla3:
    lda pesofinal2
    cmp pesofinal1
    bhi sgte25
    jmp sgte251
sgte25:  sta pesofinal1
sgte251: rts
    
```

**VI. DESCRIPCIÓN DE LA DEFUZZIFICACIÓN**

Para la salida, en la defuzzificación se implementaron 3 conjuntos difusos correspondientes a 3 triángulos isósceles buscando a través de ellos los valores más adecuados para complementar el PWM actual, las regiones que se utilizaron fueron disminuir, mantener y aumentar; dichas regiones se pueden sectorizar de acuerdo a la interpretación que tenga los datos como se ve en la figura 3.

En la defuzzificación se hizo una aproximación al cálculo del centroide (método empírico). La cual consiste en realizar una comparación de los pesos de cada región, y luego se aplica una regla de tres para aproximar el valor que corresponde a dicho centroide, lo cual significa incrementar, decrementar o mantener el ciclo de dureza o PWM.

Figura 3. Defuzzificación señal de excitación



Después de haberse realizado los cálculos entre los antecedentes de las reglas activadas (etapa de la máquina de inferencia), al consecuente que se logra le corresponde el peso calculado. Los conjuntos difusos que corresponde a los consecuentes de las reglas activadas se los denomina conjunto de salida.

Los pesos de las áreas que están implicadas deberán ser traducido al valor numérico más adecuado en términos de la variable física a controlar (defuzzificación).

Para ello se han implementado múltiples técnicas que ayudan a encontrar el valor más óptimo, la técnica mas empleada es la del centroide cuya forma genérica es:

$$F_{xy} = \frac{\int yf(y) dy}{\int f(y) dy}$$

**Descripción del algoritmo para la defuzzificación**

Para lograr lo anterior se busca una aproximación a dicha técnica de la forma más simple posible, como se verá a continuación:

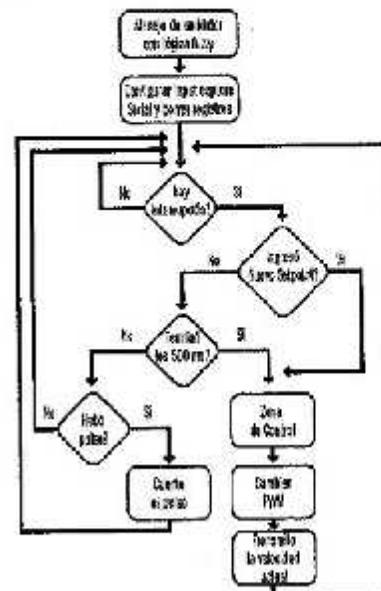
En la subrutina, se realizó una comparación entre los pesos de salida que nos indica el conjunto difuso de mayor influencia en el cual se encontrará el centroide, para luego aplicar una resta entre ambos y además una regla de tres con la cual se determina aproximadamente el centroide del área implicada, la regla de tres parte de un principio básico que consiste en que si las dos áreas son iguales el centroide está en la mitad de los dos que en nuestro caso es 10, por lo tanto la regla de tres compara valores entre 0 y 255, con un valor definido para 10 como 255 de la siguiente forma: 10 es a 255 como la resta entre los

pesos es a un valor a determinar, luego de hallar dicho valor, éste se resta a 40 y su resultado será el centroide aproximado como se verá a continuación.

```

;chequeo de decisión de salida entre
;disminuir y mantener o igual
defuzreg2:
    bclr flag_defuz,reg_pwm
    bclr aumentar,reg_ctr,despue21
; indica si el valor de defuzzificación es
;positivo o negativo
    bset flag_defuz,reg_pwm
    lda pesosfinal1
    cmp pesosfinal2
    blo proto
    sub pesosfinal2
    sta pesosfinal2
    bclr flag_sintonia,reg_ctr
despue21: lda pesosfinal3
    rts
proto: bset
flag_sintonia,reg_ctr
    sub pesosfinal3
    nega
    sta pesosfinal2
    lda pesosfinal3
    rts
defuzprom:
    lda pesosfinal3
    ldx ancho_pul_med
    mul
    stx pesosfinal1
    ldhx pesosfinal1
    ldx #255t
    div
    sta pesosfinal1
    rts
    
```

**7. DIAGRAMA DE FLUJO**



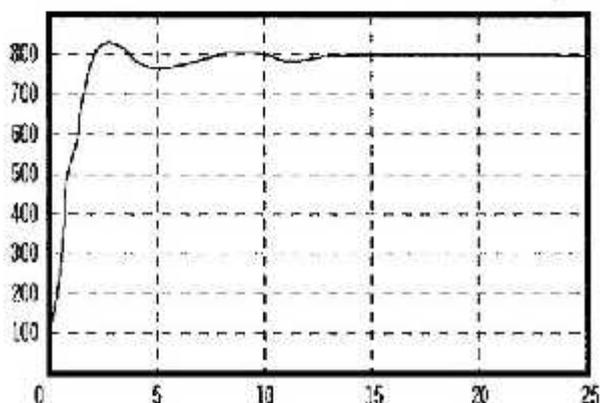
**Tecnología**

**VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para poder implementar el control del motor se debió parametrizar el motor en lazo abierto para determinar las zonas lineales y no lineales tratando de encontrar los puntos críticos o sectores difíciles de controlar, en los cuales el control debe mostrar su capacidad para sintonizar la velocidad que el usuario desea.

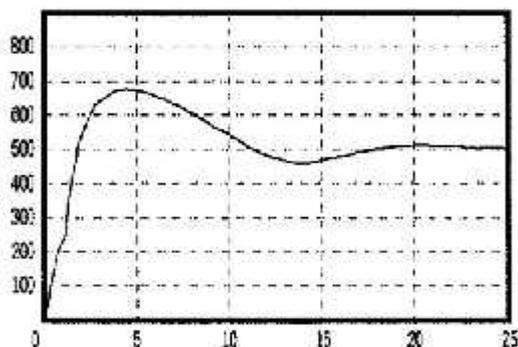
Observemos el comportamiento del motor ante varios set points.

Figura 4. Set point de 800 rpm



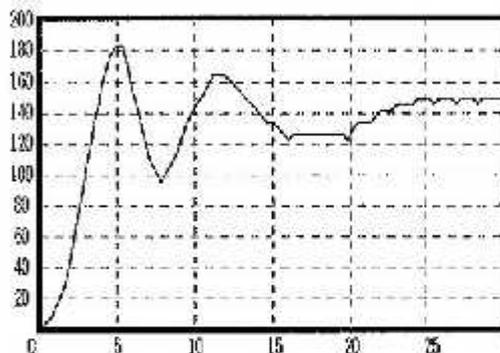
La respuesta transitoria del sistema para un set point de 800rpm exhibe una característica críticamente amortiguada.

Figura 5. Set point de 500 rpm



La respuesta transitoria del sistema para un set point de 500 rpm exhibe una característica subamortiguada

Figura 6. Set point de 100 rpm



La respuesta transitoria del sistema para un set point de 100 rpm exhibe una característica subamortiguada

Para las gráficas se tienen los siguientes parámetros:

Donde:

- td: tiempo de retardo, es el tiempo que se tarda el sistema para alcanzar la mitad de la velocidad final.
- tr: tiempo de crecimiento, es el tiempo que se tarda para llegar por primera vez al set point.
- tp: tiempo pico, es el tiempo en que se demora para llegar al primer sobre impulso.
- Mp: sobre impulso máximo, es el primer valor pico que se observa en la gráfica, generalmente se da en porcentajes así:

$$(Mp = ((\text{set point} - \text{valor pico}) / \text{set point}) * 100)$$

- ts: tiempo de establecimiento, es el tiempo que se tarda el sistema para estabilizarse, para saber el momento en que se estabilizó se utiliza el criterio del 5% o el criterio del 2%, consiste en que si la diferencia entre el set point y el valor actual (error) de la variable física a controlar es menor al porcentaje dicho anteriormente (5% ó 2% del set point) entonces se dice que el sistema se estabilizó.

Tabla 3. Características de las respuestas en el transiente.

Parámetros	Set point		
	806	500	130
Td	2.5	2	0.8
Tr	7.5	4.5	1.3
Tp	8	5	2
Mp	0.49%	4%	27.89%
Ts	7.5	6.5	5

Luego de dar las definiciones se hablará del comportamiento global del sistema.

Según lo observado para velocidades altas el sistema muestra una gran rapidez para alcanzar el set point (ts pequeño), sin mucho sobreimpulso (Mp insignificante y el valor pico es 810 rpm) y con un ínfimo error (aproximadamente 2), a velocidades mayores de 800 rpm el motor es prácticamente lineal.

A velocidades medias, el sistema presenta cierta demora para alcanzar el set point (ts relativamente grande), con un pequeño sobre impulso (Mp despreciable y el valor pico es 520 rpm) y con un error pequeño (aproximadamente 4).

Al hacer el análisis para velocidades bajas, el sistema se comporta con ciertas dificultades para responder a las acciones implementadas por el control fuzzy, es decir el motor se tarda mucho en alcanzar el set point (ts muy grande), posee un gran sobreimpulso (Mp significativo y el valor pico es 166 rpm) y un error crítico (aproximadamente 6).

Un aspecto importante que se debe tener en cuenta en este control, es que al variar las pendientes de la recta de triángulos y trapecios se puede afectar el funcionamiento del controlador Fuzzy, ya sea para mejorar o empeorar el control.

Finalmente se debe realizar un análisis sobre el rendimiento que el microcontrolador tiene para ejercer el control implementado en assembler sobre la planta, para ello tenemos que conocer la frecuencia de funcionamiento (ff) del MCU, se sabe que  $ff = 1.2288$  MHz (ciclos por segundo) y al realizar la simulación del algoritmo de control se obtiene en promedio 4829 ciclos de reloj, por lo tanto si lo dividimos por ff se obtiene tiempo que se demora el MCU en realizar el control sobre la planta, cuyo cálculo es 3.93 milisegundos, en la industria este tiempo se puede catalogar como irrisorio pues generalmente los procesos industriales son lentos.

A continuación se observará los resultados de un control tradicional implementado sobre el mismo motor:

Figura 7. Set point de 800 rpm

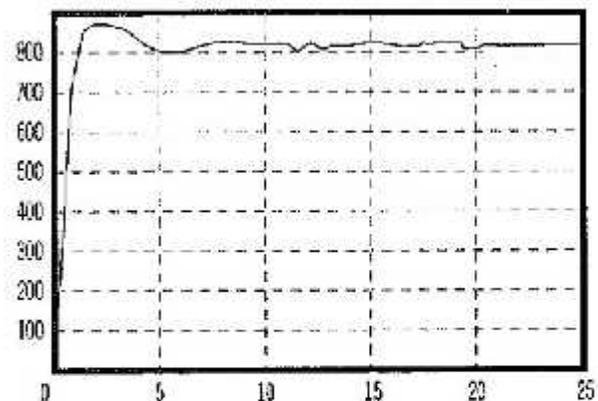


Figura 8. Set point de 400 rpm

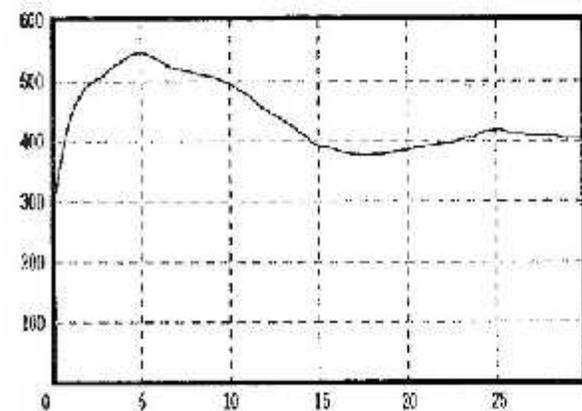
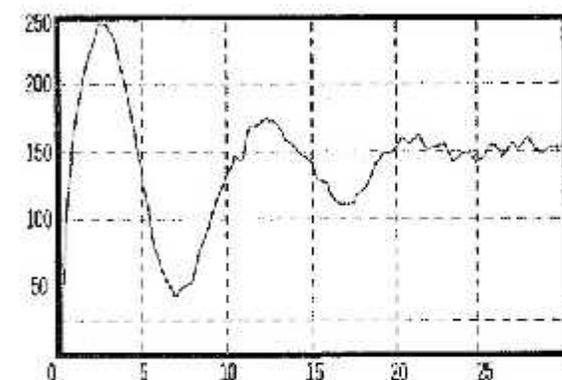


Figura 9. Set point de 150 rpm



## Tecnología

### IX. CONCLUSIONES

El control fuzzy contempla muchas posibilidades a la hora de tomar una decisión, lo que lo hace rápido y preciso, demostrando su eficacia inclusive, en casos extremos y en regiones de gran alinealidad.

Se ha visto como el motor DC presenta regiones muy alineales en las cuales el control del motor es complicado para la teoría de control tradicional, pero con el control por lógica difusa, se logra dicho control satisfactoriamente.

Para hacer un control óptimo de velocidad de un motor DC, es necesario tener en cuenta aspectos tales como: la escogencia acertada de la frecuencia del PWM, de modo que el motor responda según sus características nominales, y la variación de la velocidad con el PWM, para así determinar las regiones críticas de funcionamiento del motor.

### Referencias

1. WANG, Li Xing, Adaptive Fuzzy System and control Design and Stability Analysis, California, Prentice Hall, 1994. P 1-28,102-139
2. SCHNEIDER, Moti, KANDEL, Abraham, CHEW, Gerard, LANGHOLZ, Gideon, Fuzzy Expert System Tools, Gran Bretaña, John Wiley, 1996, P 23-78
3. KUO, Benjamin C., Digital Control Systems, Illinois, Saunders College, 1992, P 75-122, 317-382, 456-606
4. WOLOVICH, William A., Automatic Control Systems: Basic Analysis and Design, Estados Unidos, Saunders College, P 165-204, 271-411