

SIMULACIÓN DE SISTEMA DIFUSO PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR C.D

I.S.C Coronel Lemus Martha Esmeralda Estudiante de Maestría del ITZ., esmeralda_coronel@hotmail.com y **M.C. Hernández Reyes José Antonio** Catedrático del Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos, jantoniohr@hotmail.com

RESUMEN. En este trabajo se presenta el desarrollo de un controlador difuso de la velocidad de un motor de CD ante variaciones en el par de carga (Ver figura 1).. El trabajo se desarrolla a nivel de simulación empleando el software MATLAB 5.3 (Simulink y la herramienta “fuzzy logic”). El método de inferencia empleado es la Implicación de Mandani.

Palabras clave. Simulación, Lógica difusa, Control difuso, Motor CD

I. INTRODUCCIÓN.

En los últimos años los sistemas difusos (SDs) se han venido consolidando como una herramienta útil para tratar y modelar sistemas complejos y no lineales. Especialmente en áreas como el control, el

procesamiento de imágenes, la robótica y la electrónica de consumo, los SDs han sido incorporados en un gran número de productos y procesos [11] [12].

Las técnicas de inteligencia artificial se han convertido en una herramienta fundamental para abordar problemas complejos incluyendo el área de Control Automático [1]. El Control Automático ha desempeñado una función vital en el avance de la Ingeniería y de la Ciencia. Además de su extrema importancia en los sistemas de vehículos espaciales, guiado de misiles, robótica etc., el control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura.[4]

La inteligencia artificial tiene varias ramas, entre ellas se encuentra la Lógica Difusa. A diferencia de la Lógica Convencional, en donde sólo son posibles los valores de falso o verdadero, la Lógica Difusa permite definir valores intermedios en un intento por aplicar un modo de pensamiento similar al del ser humano [5].

La representación de conocimiento impreciso via conceptos y variables lingüísticas es la belleza fundamental que existe detrás de la logica difus, ahora se empieza a programar en lenguaje natural existiendo un universo de aplicaciones en la actualidad, como se puede observar :[3]

Aplicaciones en el hogar:

- Lavadoras Automáticas
- Aire Acondicionado
- Hornos de Microondas
- Refrigeradores

- Limpiadoras de Alfombras

Reconocimiento de Patrones:

- Reconocimiento de Voz
- Visión por computadora
- Reconocimiento Óptico de Caracteres

Aplicaciones Industriales:

- Navegación Automática de Robots
- Operación de Plantas de Cemento
- Control de Hornos de Vidrio
- Control de Reactores Nucleares

Medicina:

- Diagnostico Medico
- Diagnostico de Rayos-X
- Herramientas de Endoscopia
- Control de Presión sanguínea

El Control Difuso se introdujo a comienzos de los años 70 como un intento para diseñar controladores para sistemas que son estructuralmente difíciles de modelar, debido a su naturaleza no lineal y a otras complejidades en la obtención del modelo. Durante los últimos años el Control Difuso ha emergido como una de las áreas de mayor investigación [2].

Por otra parte, los motores de CD son muy usados en nuestros días en diferentes áreas como: industria automotriz, medicina, electrodomésticos, robótica, NASA, etc

Existen aplicaciones de motores de CD en los que se requiere tener un control adecuado del mismo, por ejemplo, el control de servomotores de modelismo, que son los que se usan en aviones, coches y vehículos a escala de control remoto. Esos son los motores más utilizados en el desarrollo de robots animatronics, con fines de entretenimiento (en el cine, como exposiciones), y tienen una aplicación muy importante en áreas de investigación espacial, subacuática, etc., solo por mencionar algunas aplicaciones de control. [1]

En este trabajo se presenta el desarrollo de un controlador difuso para el control de la velocidad de un motor de CD ante variaciones en el par de carga (Ver figura 1).

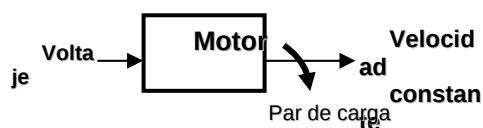


Figura 1. Perturbación en el par de carga, velocidad constante.

Este artículo ha sido organizado de la siguiente forma: En la sección II se definen los fundamentos de lógica difusa y la estructura de un sistema difuso. En la sección III se presentan de manera breve los fundamentos de los sistemas de control. En la sección IV se muestran los resultados de la simulación del controlador difuso. La sección V expresa las conclusiones y el trabajo a futuro.

II.FUNDAMENTOS DE LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa es una metodología que proporciona una manera simple y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada, ambigua, imprecisa, o incompleta, en general la lógica difusa modela como una persona toma decisiones basada en información con las características mencionadas, en esto se diferencia de la lógica convencional, que trabaja con información bien definida y precisa.

En las teorías tradicionales se obliga a que las representaciones del mundo real que se realizan encajen dentro de modelos muy precisos, tomando la imprecisión como un factor de distorsión.

III. CONJUNTOS CLÁSICOS

Los conjuntos en la teoría clásica son altamente restrictivos en el sentido de que un elemento o pertenece o no pertenece a un conjunto dado.

En otras palabras, en un conjunto bien definido (lógica clásica), la pertenencia o no pertenencia de un elemento x a un conjunto A se describe mediante la función característica $\mu_A(x)$ donde: [1]

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

Dicha función es llamada función de membresía de A , y esta definida para todos los elementos del universo, esta función hace un mapeo de todo el universo U a su conjunto de evaluación de dos elementos $\{0,1\}$, esto se escribe:

$$\mu_A(x) : U \rightarrow \{0,1\} \quad (2)$$

II.III CONJUNTOS DIFUSOS

La lógica difusa trabaja con conjuntos a los cuales llamamos conjuntos difusos, estos conjuntos están definidos por sus funciones de pertenencia, la cual expresa la distribución de verdad de una variable [2].

Un conjunto difuso se puede definir matemáticamente al asignar a cada posible individuo que existe en el universo de discurso, un valor que representa su grado de pertenencia o membresía en el conjunto difuso. Este grado de membresía indica cuando el elemento es similar o compatible con el concepto representado por el conjunto difuso.

Ejemplo: Supongamos que tenemos tres conjuntos de tipos de estaturas de personas con valores dentro de los siguientes rangos:

Baja = (130-160 cm.)
Media = (160-180 cm.)
Alta = (180-200 cm.)

En la Figura 2 a) tenemos una representación utilizando **conjuntos clásicos**. En esta representación una persona que mida 180 cm. Es considerada de estatura media, y en cambio una persona con 181 cm. ya no. Vemos que esto no corresponde con la realidad.

En la figura 2 b) Se observa que existe un grado de pertenencia a los **conjuntos difusos**. Así, una persona que tenga una estatura de 172 cm. Pertenecería en un 40% ($MEDIA(172)=0.4$) al conjunto de personas con estatura media y en un 10% ($ALTA(172)=0.1$) al de estatura alta.

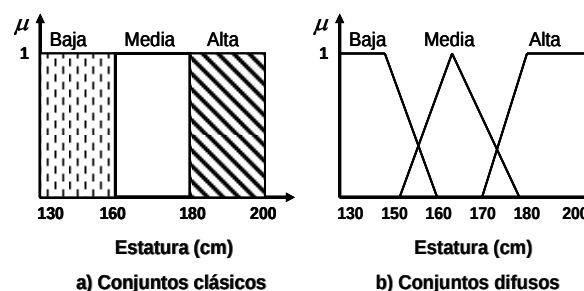


Figura 2. Ejemplo de conjuntos

Como podemos ver, los conjuntos difusos son un instrumento adecuado para modelar los predicados inexactos de los lenguajes naturales. [6]

II.IV FUNCIONES DE PERTENENCIA

La función de pertenencia se establece de una manera arbitraria, basándonos en la experiencia del usuario y contexto del problema, además, pueden tomar formas distintas, aunque en la práctica generalmente se eligen algunas de las siguientes figuras:

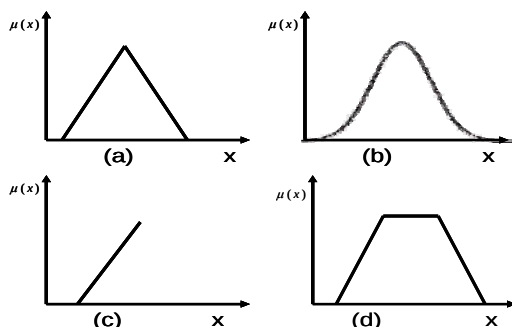


Figura 3. Funciones de membresía más utilizadas.
(a).Triangular, (b).Forma de Campana, (c).Monotonica,
(d).Trapezoidal.

II.V OPERACIONES DE CONJUNTOS DIFUSOS

Como ya se dijo, en la lógica difusa se emplean conjuntos, así que contamos con operaciones de complemento unión e intersección. Cuando a dos variables difusas se les aplica una operación de “unión” (que en la lógica binaria es equivalente a una operación OR), el resultado se obtiene tomando el valor mas grande de entre las variables de entrada, $\max (X_1, X_2, \dots, X_n)$.

Para el caso de la “intersección” (que equivale a la operación AND) el valor resultante de la operación corresponde al mínimo valor de alguna de las entradas: $(X_1, X_2, \dots, X_n)$.

En la operación “complemento” (equivale a una operación NOT), se toma el valor que completamente a 1, de esta forma: [7]

$$x' = 1 - x \quad (3)$$

A fin de aclarar esto, mostraremos el siguiente ejemplo. Sea A un intervalo difuso entre 5 y 8, y B un número difuso entorno a 4. Las figuras correspondientes se muestran en la figura 4: [8]

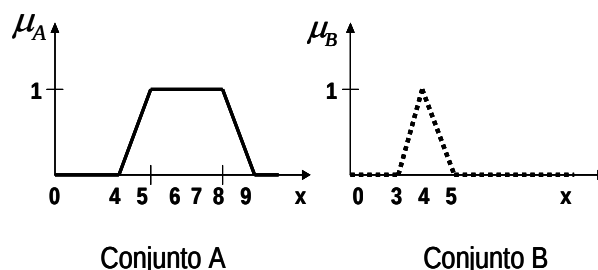


Figura 4 Conjuntos A y B

La figura 5 muestra la operación AND (Y) del conjunto difuso A y el número difuso B (el resultado es la línea)

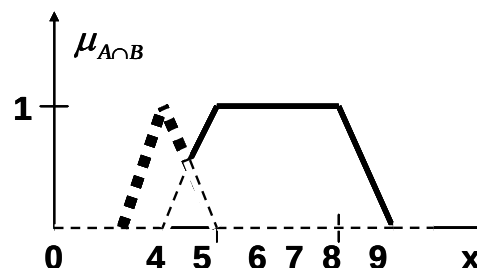


Figura 5 Operación de AND de conjuntos difusos A y B

La operación OR (O) del conjunto difuso A con el conjunto difuso B se muestra en la figura 6 (nuevamente, es la línea ---).

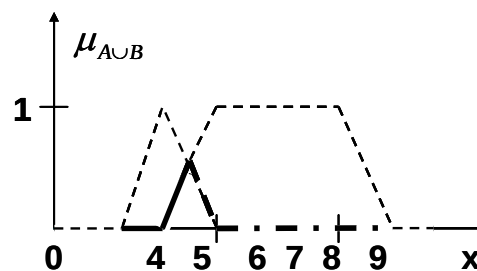


Figura 6 Operación de OR de conjuntos difusos A y B

En la figura 7 se muestra un ejemplo de la negación. La línea--- es la NEGACION del conjunto difuso A.

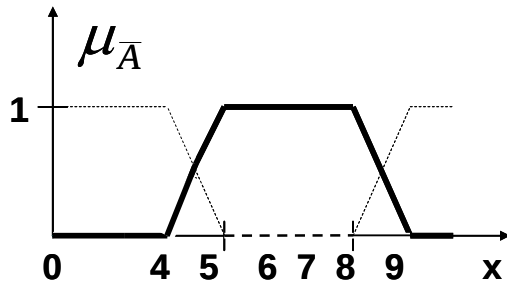


Figura 7 Complemento de conjunto difuso A

El principal beneficio de la lógica difusa es que con ella se puede describir el comportamiento de un sistema, mediante simples relaciones “si-entonces” o “if-then” estas permiten describir el conjunto de reglas que utilizaría un ser humano para controlar el proceso con toda la imprecisión que poseen los lenguajes naturales y, solo a partir de estas reglas, generan las acciones que realizan el control. Por esta razón, también se les denominan controladores lingüísticos.

II.VI ESTRUCTURA DE SISTEMA DIFUSO

Un sistema difuso consta de:

- Etapa de fuzzificación:** Esta etapa se encarga de la transformación de las variables controladas entregadas por el proceso, en variables de tipo lingüísticas. Como resultado de la fuzzificación se obtiene valores lingüísticos medidos.
- Reglas:** Contiene las reglas difusas que encierran el conocimiento necesario por la solución del problema de control. Las reglas de control constan de reglas si <condiciones> entonces <acciones>.
- Máquina de inferencia:** Realiza la tarea de calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada, mediante las reglas y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos de salida. En el presente trabajo se implementó el método de inferencia de Madani [4].
- Defuzzificación:** El resultado de la inferencia difusa es retraducido de un concepto lingüístico a una salida física gracias al proceso de defuzzificación.

$$Z^* = \frac{\sum_{j=1}^q z_j \mu_c(z_j)}{\sum_{j=1}^q \mu_c(z_j)} \quad (4)$$

donde q es el número de niveles de cuantización de salida, z_j es la suma de las salidas de control en el nivel de cuantización j y $\mu_c(z_j)$ representa los valores de la función de membresía en c. En otras

palabras, este método asigna el centro del área de la salida difusa final al valor defuzificados.

El centro de área también es llamado centro de gravedad o centroide.

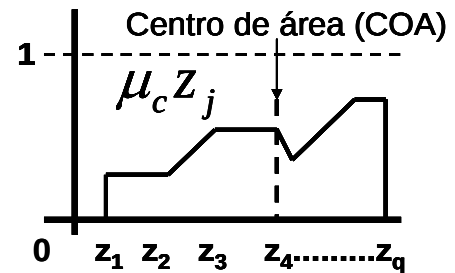


Figura 8. Método de defuzzificación de Centro de Área (COA).

Por lo tanto, en la figura 9 se muestra el diagrama general de una sistema difuso.

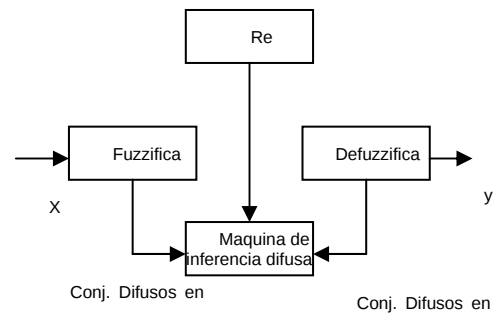


Figura 9 Diagrama general de un sistema difuso

En la figura 9 se describe lo pasos que se siguen para poder realizar un sistema difuso, esto es, si tenemos una entrada (valor numérico), se puede representar este valor con una variable lingüística de un peso dado, después se realiza la evaluación de las reglas que son las que gobiernan el sistema difuso [1], por último se vuelve a pasar de una variable lingüística a un valor numérico.

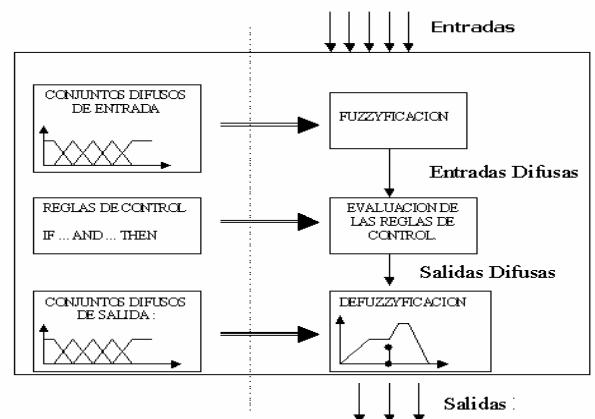


Figura 10 Máquina de inferencia difusa.

III FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema de control es un arreglo de componentes físicos conectados de tal manera que el arreglo se pueda manipular, dirigir o regular a sí mismo o a otro sistema.

Los sistemas de control son muy comunes en todos los sectores industriales, desde el control de calidad de productos industriales, líneas de ensamblaje automático, control de máquinas herramientas hasta el control por computadora, etc., incluso los sistemas de control económico pueden resolverse con enfoques de la teoría de control [10].

Los sistemas de control se clasifican en dos grandes categorías:

- *Sistemas de lazo abierto.*- Es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida. Vea la figura 11.(a)
- *Sistemas de lazo cerrado.*- Es aquel en el cual la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida, estos sistemas se llaman comúnmente, sistemas de control por retroalimentación. Vea la figura 11 (b).

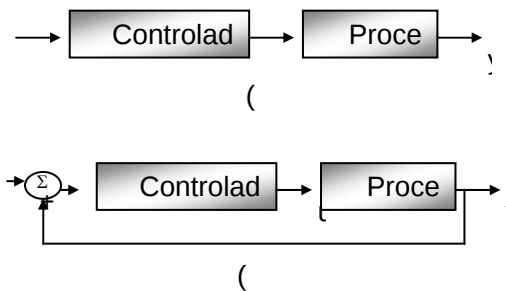


Fig. 11 Sistemas de control de lazo abierto y de lazo cerrado. Nota: r = referencia, e = error, u = control, y = salida proceso

En este trabajo se emplea un sistema de control en lazo cerrado.

A partir del uso del software MATLAB se llevó a cabo la simulación del control difuso, para el control de velocidad del motor CD.

V. RESULTADOS DE LA SIMULACION

El controlador difuso propuesto en este trabajo se presenta en la figura 12.

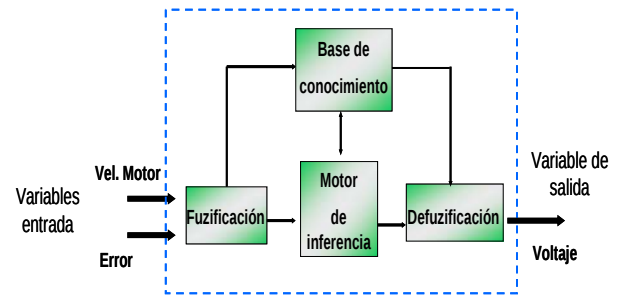


Figura 12 Estructura de controlador difuso

La planta que se va a controlar, es un motor CD, donde su modelo en forma linealizada, se tomo de (9) y consiste de las siguientes ecuaciones.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_f \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ \frac{K_1}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix}$$

(5)
donde:

K_1 es igual al producto $L_{af} I_a$
 V_a = Voltaje de armadura, voltios
 I_a = Corriente de armadura, amperios
 R_a = Resistencia de armadura, ohmios
 L_a = Inductancia de armadura, henrios
 L_{af} = Inductancia mutua de velocidad, henrios
 J = Momento de inercia del motor, kg-m^2
 B = Coeficiente de fricción viscosa, $\text{kg-m}^2/\text{s}$
 T_L = Par externo aplicado al motor, N-m
 ω = Velocidad angular del motor, rad/seg

Los valores utilizados, para el desarrollo de este trabajo son

$L_a = 0.012$ henrios
 $R_a = 0.6$ ohmios
 $K = 1.8$
 $J = 1.2 \text{ kg-m}^2$
 $B = 0.35 \text{ kg-m}^2/\text{s}$

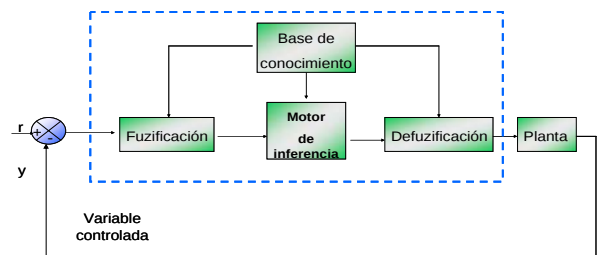


Figura 14. Esquema de control de lazo cerrado

El esquema de control de lazo cerrado que muestra todas las partes involucradas se muestra a continuación.

El objetivo del control es lograr que:

$$|y(t) - r(t)|_{\infty} \in \epsilon : \text{pequeño}$$

donde:

$$|\alpha(t)|_{\infty} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |\alpha(t)| dT$$

donde: **r(t)** es la velocidad que deseada en el motor.

y(t) es la velocidad que desarrolla el motor.

t es la variable tiempo.

Como en todo lazo de control, se debe especificar claramente cuáles serán las variables de entrada y salida que se quiere relacionar a través del controlador.

El controlador difuso empleado en este trabajo se presenta a continuación.



Figura 15 conjuntos de controlador difuso

En el controlador difuso se tienen dos variables de entrada: velocidad de motor y error. La velocidad del motor tiene 5 funciones de membresía (Ver figura 16).

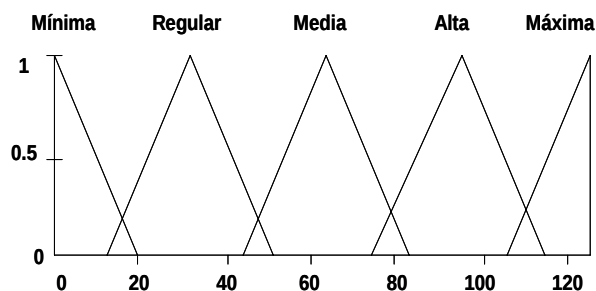


Figura 16. Funciones de Membresía de la variable de entrada velocidad del motor.

La variable de error presenta 3 funciones de membresía (Ver figura 17).

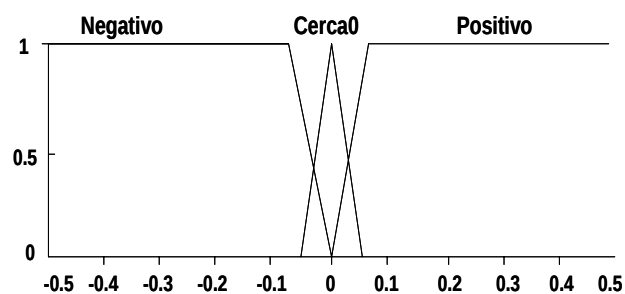


Figura 17 Funciones de membresía de variable de entrada error.

La salida del controlador es el voltaje, el cual se ha dividido en cinco funciones de pertenencia (Ver figura 18).

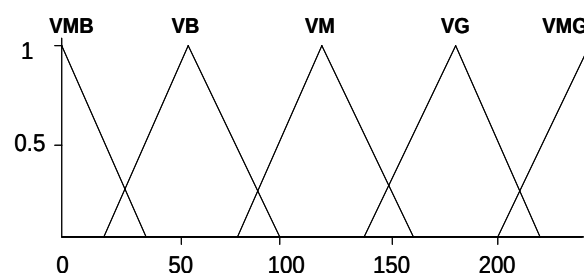


Figura 18.- Funciones de membresía de variable de salida Voltaje.

En las reglas se tiene una representación implícita del modelo, por cuanto de ellas se puede deducir aproximadamente el comportamiento del proceso.

Una forma muy común de representar las reglas difusas, es mediante una representación en forma de matriz, conteniendo dos antecedentes que en este caso son Vel. Motor y Error y un consecuente llamado Voltaje.

Vel.Motor / Error	Neg	Cerca 0	Pos
Min	VMB	VMB	VB
Reg	VMB	VM	VM
Med	VB	VG	VG
Alta	VM	VMG	VMG
Max	VG	VMG	VMG

Figura 17 Matriz de control.

Donde:

Vel.Motor (Var.Entrada 1):

- Min = Mínima
- Reg = Regular
- Med= Media

- Alta = Alta
- Max. Máxima

Error (Var. de Entrada 2):

- Neg= Negativo
- Cerca 0 = Cerca de cero
- Pos= Positivo.

Voltaje (Var. Salida):

- VMB= Voltaje muy bajo
- VB= Voltaje bajo
- VM= Voltaje medio
- VG = Voltaje grande
- VMG= Voltaje muy grande.

Con el objetivo de comparar el desempeño del controlador propuesto se realizó la simulación de control PID convencional.

Las pruebas se realizaron utilizando el software MATLAB con la herramienta Simulink, ver esquema de control PID en la figura 19.

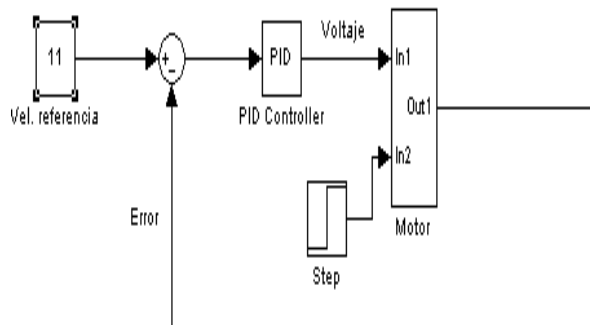


Figura 19 Esquema de control PID convencional.

Al realizar la simulación de control PID convencional, con una velocidad de referencia de 11 rad/seg sin par de carga, como se observa en la figura 20, a los 6.1 segundos la velocidad se reguló.

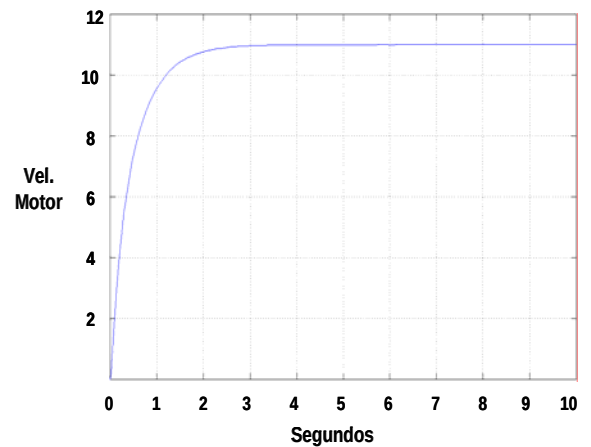


Figura 20. Simulación de control PID sin par de carga con una velocidad de referencia de 11 rad/seg

En la figura 21 se muestra el resultado de control PID convencional, para una velocidad de referencia de 11 rad/seg y al 6.2 segundos el sistema se perturba con un par de carga de 25 N.m, se observa que los efectos de la perturbación desaparecen a los 9.6 segundos.

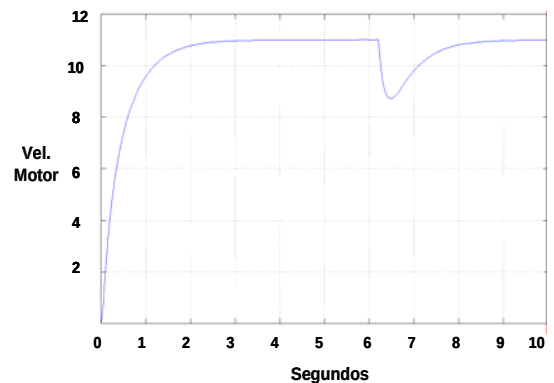


Figura 21 Simulación de control PID con una velocidad de referencia de 11 rad/seg y un par de carga de 25 N.m

Simulación del controlador difuso:

En la figura 22 se muestra el controlador difuso total, el cual se implementó utilizando la herramienta Simulink de Matlab 5.3.

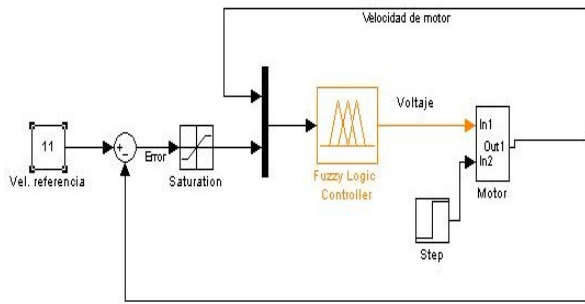


Figura 22. Esquema de control difuso propuesto

Al realizar la simulación de control difuso con una velocidad de referencia de 11 rad/seg sin par de carga, como se observa en la figura 23, a los 0.4 segundos velocidad se regulada, por lo tanto el resultado es satisfactorio.

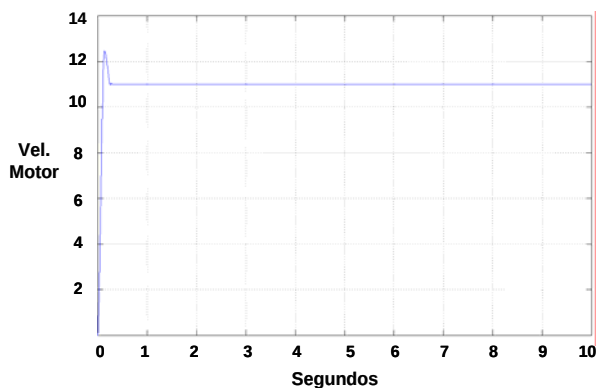


Figura 23 Simulación de control difuso sin par de carga con una velocidad e referencia de 11 rad/seg

En la figura 24 se muestra el resultado del control difuso para cuando se tiene una velocidad de referencia de 11 rad/seg y a los 6.2 segundos el sistema es perturbado con un par de carga de 25 N.m, se observa que los efectos de la perturbación desaparecen a los 6.3 segundos.

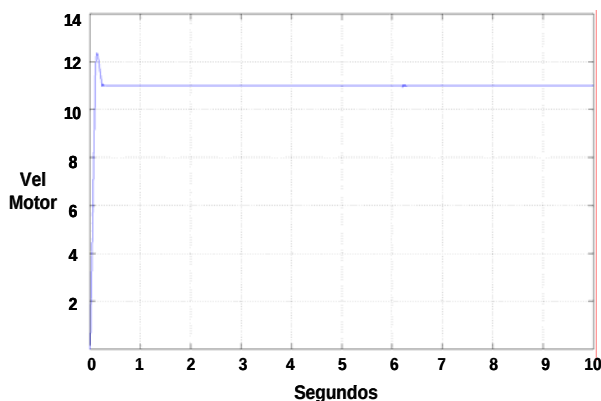


Figura 21 Simulación de control difuso con una velocidad de referencia de 11 rad/seg y un par de carga de 25 N.m

V Conclusión:

El controlador difuso propuesto en este artículo, establece un conjunto de reglas de inferencias basadas en el error, se pudo observar que la recuperación de la velocidad ante la acción de un par de carga es relativamente muy rápida en tan solo 0.1 segundos, por lo tanto esta demostrado que su desempeño es satisfactorio, contra los resultados obtenidos al implantar el control PID convencional.

Se pudo observar que la recuperación, con el PID, de la velocidad ante la acción de un par es de 2.5 segundos, lo que es muy lento comparado con la velocidad de respuesta obtenida con el controlador difuso propuesto.

Por lo anterior, queda demostrada la eficiencia del control difuso sobre el control PID convencional.

Por lo tanto la aportación

Actualmente se esta trabajando para implementar este controlador difuso en tiempo real, aplicado al control de velocidad de un objeto móvil.

Referencias:

- [1] Julio Braslavsky "Control Automático" , Congreso Ingeniería en Automatización y Control Industrial, de la Universidad Nacional de Quilmes, Argentina, 2002
- [2] WANG, Li-Xin, "Adaptive Fuzzy Systems and Control", PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994
- [3] Ing. Víctor Hugo Ponce Ponce), "Diseño de Algoritmos de Control Basados en la Lógica Difusa", Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México. 1994
- [4] Gabriel Morales Ramírez, José Fermi Guerrero Castellanos, José Miguel Sánchez Bautista, José Pedro Sánchez Santana, Robocatepetl JGX, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica. 2002
- [5] Manuel Ley, Oscar L..Chacón y Ernesto Vázquez, Control de voltaje de sistemas de potencia utilizando lógica difusa, (Área de Control de CFE de Baja California, México), (Universidad Autónoma de Nuevo León, México), 2000

[6] Faraón Llorens, Lógica Multivaluadas o Polivalentes, Universidad Politécnica Superior de Alicante España,.Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial. 2000

[7] D. Driankov, H. Ellenwood, M. Rein frank. An introduction to fuzzy control, Editorial Springer, 1998

[[8] Peter Bauer, Stephan Nouak, Roman Winkler , "Fuzzy Logic and Fuzzy Control" Johannes Kepler Universität Linz Austria, 2000

[9] Ing. Salvador Saucedo Flores, Simulación del control difuso de un motor CD. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México, 2000.

[10] Timote J. Maloney, Electrónica Moderna Industrial, tercera edición, Prentice Hall, 2002

[11] C. V. Altrock, Fuzzy Logic and neuro Fuzzy applications explained, Prentice Hall, 1995.

[12] C. V. Altrock, "Fuzzy Logic and Neuro Fuzzy Technologies in Appliances" Embedded System Conference, 1999.