



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“Diseño y Simulación de un proceso de control de un motor de inducción con un controlador de lógica difusa”

TESINA DE SEMINARIO

Previo a la obtención de los Títulos de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

INGENIERO EN TELEMÁTICA

Presentada por:

Andrés Ricardo Cobo Plaza.

Pablo Sebastián Narváez Molina.

Edwin Israel Cevallos Guaján.

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO: 2012

AGRADECIMIENTO

A Dios que nos ha dado vida, salud e inteligencia y nos ha permitido alcanzar nuestro primer objetivo en nuestra vida profesional.

A nuestra directora, PhD. Indira Nolivos por guiarnos con sus conocimientos para el desarrollo de la presente tesina. Al M.Sc. Dennys Cortéz, M.Sc. Efrén Herrera, Ing. Carlos Jordán y al Ing. Christian Camacho por brindarnos su experiencia, ayuda incondicional y proveernos de las herramientas necesarias.

De una manera muy especial, a nuestros familiares y amigos que siempre nos apoyaron y estuvieron con nosotros.

DEDICATORIA

A Dios, por bendecir mi vida día a día. A mi madre, Zoila, por su infinito amor, entrega y cuidados de toda una vida. A mi padre, Efraín, por ser mi ejemplo de responsabilidad, humildad y sencillez. A mis hermanos, Karina, Edison y Carolina, que me han apoyado incondicionalmente, a Paola por estar conmigo en cada momento y por demostrarme que el amor supera a la distancia.

Edwin I. Cevallos G.

A mis padres por haberme brindado la oportunidad de estudiar, y en más de una ocasión la vida. A ellos que han depositado su confianza en mí confiándome grandes responsabilidades.

Pablo S. Narváez M.

Dedico este trabajo a Dios por guiar mis pasos en todo momento. A mis padres, por darme todo su amor, cuidar de mí y estar siempre conmigo apoyándome en todo. Gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta. A mis hermanos, por ser mis ejemplos de superación y por todo el apoyo incondicional y cariño que siempre me han brindado. A mi familia del VAEB por brindarme su amistad y apoyo durante mi vida universitaria.

Andrés Cobo Plaza.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Trabajo de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la

Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Andrés Ricardo Cobo Plaza

Pablo Sebastián Narvárez Molina

Edwin Israel Cevallos Guaján

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

PhD. Indira Nolivos

PROFESORA DEL SEMINARIO

ING. Carlos Jordán

PROFESOR DELEGADO

DEL DECANO

RESUMEN

En este proyecto se presenta el diseño y simulación de un controlador difuso para el control de velocidad de un motor de inducción trifásico, basado en los resultados obtenidos con un controlador tradicional Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para optimizar su desempeño.

Para la definición de las reglas que gobernarán la operación del controlador difuso se utilizó la arquitectura MAMDANI que consiste en una serie de reglas “Si-Entonces” de la forma:

Si X es ANTECEDENTE entonces Z es CONSECUENTE

Donde la variable X representa a los atributos observables o medibles y Z son los atributos controlables del sistema.

Para el diseño del controlador y simulación del sistema se utilizó las herramientas FIS (Fuzzy Interface System) y Simulink, las mismas que se encuentran en el entorno de desarrollo computacional de Matlab.

La obtención del modelo del motor se logró mediante datos experimentales obtenidos en prácticas de Laboratorio y mediante la identificación de sistemas del ToolBox de Matlab.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
INTRODUCCIÓN	XVI
CAPÍTULO 1	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1 Motor de Inducción.	1
1.2 Modelo de la Planta.	4
1.3 Descripción del problema	5
1.4 Objetivos.....	7
CAPÍTULO 2	9
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
2.1 Identificación de Sistemas.....	9
2.1.1 Proceso de Identificación.	10
2.2 Métodos de Control.	12
2.2.1 Control Clásico.	12

2.2.1.1 Métodos de Control Clásico.....	13
2.2.1.1.1 Controlador Proporcional(P).....	13
2.2.1.1.2 Controlador Integral (I).....	14
2.2.1.1.3 Controlador Derivativo (D).....	15
2.2.1.1.4 Controlador Proporcional-Integral (PI)	15
2.2.1.1.5 Controlador Proporcional-Derivativo (PD).....	16
2.2.1.1.6 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID).....	16
2.2.2 Control Avanzado	16
2.2.2.1 Métodos de Control Avanzado	17
2.2.2.1.1 Control Adaptativo	17
2.2.2.1.2 Control Optimal.....	17
2.2.2.1.3 Control Robusto.....	18
2.2.2.1.4 Control en Tiempo Real.....	18
2.2.2.1.5 Control Difuso.....	18
2.2.2.1.6 Control Neuronal.....	19
2.2.2.1.7 Algoritmos Genéticos.....	19
2.2.2.1.8 Sistemas Expertos.....	20
2.3 Lógica Difusa.....	21
2.3.1 Breve historia y aplicaciones.....	22
2.3.2 Conjuntos difusos.....	25
2.3.3 Funciones de pertenencia.....	26
2.3.4 Universo de discusión.....	28
2.3.5 Operaciones con conjuntos difusos.....	28
2.3.5.1 Intersección.....	29

2.3.5.2 Unión.....	29
2.3.5.3 Complemento.....	30
2.3.6 Variables y modificadores lingüísticos.....	31
2.4 Control Difuso.....	33
2.4.1 Fusificación.....	35
2.4.2 Base de conocimiento.....	36
2.4.3 Inferencia difusa.....	37
2.4.4 Defusificación.....	38
2.5 Tipos de Controladores Difusos.....	39
2.5.1 Controlador tipo Mandani.....	40
2.5.2 Controlador tipo Takagi-Sugeno.....	40
2.5.3 Controlador tipo Tsukamoto.....	41
CAPÍTULO 3	42
3. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES.....	42
3.1 Introducción.....	42
3.2 Identificación de sistemas.....	42
3.2.1 Características de la Planta o Proceso.....	43
3.2.1.1 Motor de Inducción.....	43
3.2.2 Configuración de la Tarjeta de datos	44
3.3 Controlador Clásico PID.....	44
3.3.1 Criterios del diseño del controlador.....	44
3.3.2 Pasos para obtener el controlador.....	45
3.4 Controlador Lógico Difuso.....	49

3.4.1 Definición de variables lingüísticas.	51
3.4.2 Tipo de funciones de membresía.....	54
3.4.3 Creación de la base de reglas.	55
3.4.4 Proceso de Inferencia.	58
3.4.5 Identificación del método de defusificación.....	60
3.5 Simulación	61
3.5.1 Simulación con controlador PID.....	62
3.5.2 Simulación con controlador FUZZY	63
CAPÍTULO 4	70
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
4.1 Respuesta a la señal de entrada.....	70
4.2 Análisis de resultados.....	74
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Motor de Inducción.	1
Figura 1.2	Modelo de Control Clásico.....	5
Figura 1.3	Modelo de Control Fuzzy.....	5
Figura 2.1	Diagrama de bloques de un Sistema.....	13
Figura 2.2	Representación del Controlador Proporcional.....	14
Figura 2.3	Representación del Controlador Integral.....	14
Figura 2.4	Representación del Controlador Derivativo	15
Figura 2.5	Conjunto Difuso “Temperatura”	26
Figura 2.6	Funciones de pertenencia mas habituales: (a) Triangular, (b) Trapezoidal, (c) Gaussiana, (d) Sigmoidal.....	27
Figura 2.7	Conjuntos difusos entre los que se definirán las operaciones ..	28
Figura 2.8	Intersección entre dos conjuntos difusos.....	29
Figura 2.9	Unión entre dos conjuntos difusos.....	30
Figura 2.10	Complemento de un conjunto difuso.....	31
Figura 2.11	Estructura de un Controlador Difuso.....	35
Figura 2.12	Fusificación de Entradas.....	36
Figura 2.13	Regla tipo Mandani.....	37
Figura 2.14	Regla tipo Takagi-Sugeno-Kang.....	38
Figura 3.1	Función Sisotool	45
Figura 3.2	Sisotool	46

Figura 3.3 Editor de Raíces en lazo abierto.....	46
Figura 3.4 Parámetros en la trayectoria de Raíces.....	47
Figura 3.5 Integrador.	47
Figura 3.6 Planta con un cero.....	48
Figura 3.7 Esquema del sistema de control difuso	51
Figura 3.8 Funciones de pertenencia para la velocidad.....	54
Figura 3.9 Funciones de pertenencia para el error.	54
Figura 3.10 Funciones de pertenencia para el voltaje.	55
Figura 3.11 Formación del polígono de salida.	59
Figura 3.12 Toolbox de Simulink.....	61
Figura 3.13 Esquema del sistema con controlador PID.....	62
Figura 3.14 Planta o Proceso.....	62
Figura 3.15 Proceso con controlador PID	63
Figura 3.16 Controlador FUZZY.....	64
Figura 3.17 Interfaz para el ingreso de variables	64
Figura 3.18 Funciones de membresía para la variable VelMotor.....	65
Figura 3.19 Funciones de membresía para la variable Error	66
Figura 3.20 Funciones de membresía para la variable Voltaje.....	66
Figura 3.21 Editor de Reglas de Inferencia.....	67
Figura 3.22 Visualizador de Reglas en ejecución del controlador FUZZY... ..	68
Figura 3.23 Superficie del controlador difuso.....	69
Figura 4.1 Sobre-pico de arranque con PID	71

Figura 4.2 Sobre-pico de arranque FUZZY	71
Figura 4.3 Tiempo de estabilización PID	72
Figura 4.4 Tiempo de estabilización FUZZY	73
Figura 4.5 Comparación del sobre-pico en el segundo ciclo.	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I – Reglas para el control difuso de velocidad.....	56
---	----

INTRODUCCIÓN

El control de velocidad de una máquina de inducción, ya sea de rotor devanado o de jaula de ardilla, requiere de un control más sofisticado que otro tipo de máquinas eléctricas. De los diversos métodos de control propuestos por diferentes autores, se destaca el control PID, el cual consiste de tres modos básicos, el proporcional (P), el integral (I) y el derivativo (D). Cuando se usa la técnica de control clásico, es necesario decidir cuáles serán usados (P, I, o D) y especificar los parámetros o ajustes para cada uno de esos controladores.

Sin embargo, a medida que se exige una mayor precisión en el sistema, el ajuste de este tipo de control se hace más difícil sobre todo por el ruido y cuando se presentan retardos, además cuando los procesos a controlar son no lineales y el control debiera tener la capacidad de compensar esas no-linealidades, el control PID no tiene la capacidad de responder a esto porque asume relaciones lineales.

El control lógico difuso por su parte surgió como una herramienta para el control de procesos industriales complejos, radicando su importancia en que permite responder a valores intermedios de variables, pasando de las dos

opciones tradicionales de “frío/caliente”, “alto/bajo”, a opciones como “Tibio” y “Medio” por ejemplo, haciendo que los sistemas se acerquen a la forma de trabajar del cerebro humano.

El objetivo principal del presente trabajo es diseñar un controlador Fuzzy que optimice los resultados obtenidos del sistema usando un controlador clásico PID. De esta manera se puede reemplazar el controlador clásico PID por el controlador Fuzzy para mejorar el desempeño del motor evitando así pérdidas o deterioro del mismo.

En el primer capítulo se hace una descripción de la identificación del motor de inducción, la obtención del controlador clásico PID y de las características principales de la teoría de lógica difusa.

En el segundo capítulo se describe la teoría de lógica difusa aplicada al diseño de un controlador definiendo sus variables lingüísticas, tipo de funciones de membresía, el motor de inferencia y métodos de defusificación.

El tercer capítulo trata sobre el diseño del controlador de lógica difusa mediante el conocimiento de un experto para optimizar los resultados obtenidos del funcionamiento del controlador clásico PID. Se usa la herramienta Simulink de MATLAB para simular el proceso de control del motor tanto para el controlador clásico PID como para el controlador Fuzzy.

En el cuarto capítulo se realiza un análisis comparativo entre el controlador de lógica difusa y el controlador clásico PID para determinar ventajas y desventajas en sus diferentes aplicaciones.

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Motor de Inducción.



Figura 1.1 Motor de Inducción.

El motor de inducción trifásico o asincrónico, y en particular con rotor tipo jaula de ardilla, son en la actualidad las máquinas eléctricas con mayor aplicación industrial. La operación típica de estas máquinas es como motor, en cuyo caso el funcionamiento básico consiste en alimentar el devanado del estator desde una fuente trifásica para producir un campo magnético rotatorio, el que induce corrientes en las barras del motor produciéndose así un torque motriz en el eje de la máquina. El motor de inducción es esencialmente de velocidad constante, cercana a la velocidad sincrónica, sin embargo, en muchas

aplicaciones es necesario operar con diferentes velocidades o poder variar estas continuamente.

Para entender mejor los métodos de control de velocidad en el motor de inducción es bueno recordar las ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3 que rigen el torque y la velocidad de esta máquina.

$$T = 3 \frac{R_r}{s\omega_s} \frac{Ve^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + L_{eq}^2 \omega_s^2} \quad (1.1)$$

$$\omega_r = (1-s)\omega_s \quad (1.2)$$

$$\omega_s = \frac{\omega_{red}}{p/2} \quad (1.3)$$

Donde:

R_r : resistencia rotórica.

R_e : resistencia del estator.

L_{eq} : inductancia equivalente del rotor y estator vista desde terminales del estator.

S : deslizamiento.

P : número de polos.

W_{red} : frecuencia eléctrica angular de alimentación.

W_s : velocidad sincrónica.

W_r : velocidad mecánica del rotor.

Para variar la velocidad del motor de inducción pueden utilizarse uno de los siguientes métodos:

- Cambio del número de polos.
- Variación del voltaje de alimentación.
- Variación de la frecuencia de alimentación.

Al cambiar el número de polos de un motor de inducción se está cambiando la velocidad sincrónica del campo rotatorio según la ecuación 1.3, por lo cual se varía la velocidad de operación de la máquina. Este método no es muy utilizado ya que sólo permite velocidades discretas, porque el número de polos es una cantidad entera. Como se puede ver la ecuación 1.1 el torque interno desarrollado por la máquina es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado, y según este voltaje variará el punto de operación del sistema. Entonces, controlando la magnitud del voltaje de alimentación solo se puede controlar la velocidad de la máquina en un pequeño rango de velocidades en torno a la velocidad nominal.

Si se varía la frecuencia de alimentación de una máquina de inducción, según la ecuación 1.2 y 1.3, se puede variar la velocidad sincrónica de la máquina y a través de ésta, la velocidad mecánica del motor. Este método de control se basa en aplicar un voltaje a una

determinada frecuencia a la máquina, para lograr una velocidad mecánica cercana a la deseada, este método combinado con un adecuado control del voltaje, permite un amplio rango de operación. Como normalmente los motores de inducción utilizados son de bajo deslizamiento, existe una buena relación entre velocidad y frecuencia aplicada. En función de su efectividad dinámica se destacan tres tipos de control de velocidad por frecuencia variable: el control escalar o Volts-Hertz, el control Vectorial o de Flujo Orientado, y el DTC (Direct Torque Control) o Control Directo del Torque [3].

1.2 Modelo de la Planta.

La configuración básica del esquema propuesto Figura 1.1 consiste de un motor de inducción alimentado por una referencia deseada. La entrada para el controlador es el error actuante, es decir, la diferencia entre la salida deseada y la salida actual, el cual es procesado por el controlador clásico. Por otra parte en el controlador difuso las entradas son, el error actuante y la salida actual como se aprecia en la Figura 1.2, para generar el comando de control necesario.

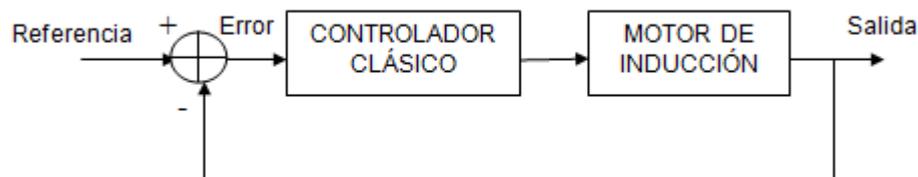


Figura 1.2 Modelo de Control Clásico.

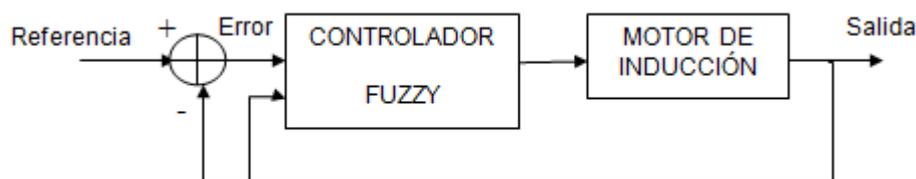


Figura 1.3 Modelo de Control Fuzzy.

1.3 Descripción del problema.

En la búsqueda de mecanismos que permitan un control eficiente de las maquinas eléctricas, se ha difundido el uso de controladores clásicos ya sean del tipo Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Derivativo (PD), Proporcional-Integral-Derivativo (PID), sin embargo el uso de estos métodos de control está limitado por el requerimiento del conocimiento previo del sistema y de la aplicación de complejos modelos matemáticos que a medida que se exige una mayor precisión en el sistema o cuando los procesos a controlar son no lineales y el control debiera tener la capacidad de compensar esas no-linealidades, no tienen la capacidad de responder adecuadamente.

Para superar estos inconvenientes se ha optado por ajustar los controladores tradicionales utilizando estrategias del control difuso, este tipo de combinación entregan respuestas más óptimas a condiciones cambiantes que experimentan los motores de inducción. En este punto es importante mencionar que el uso de estrategias de control difuso para mejorar las respuestas de los controladores clásicos no los convierte en controladores eficientes, más aún no se ajustan a la esencia misma de la lógica difusa ya que siempre dependerán del conocimiento previo del sistema y de un nivel avanzado del manejo de ecuaciones matemáticas.

Es aquí donde la técnica de la lógica difusa supera al control tradicional puesto que al no requerir el conocimiento del sistema introduce un nivel de simplicidad en el diseño al mismo tiempo que permite convertir el aporte heurístico de un operador avanzado y convertir una instrucción imprecisa o ambigua en una estrategia de control altamente robusta, flexible y eficiente; de allí que el objetivo principal de este proyecto se inclina hacia el desarrollo de un controlador cien por ciento difuso, con el fin de demostrar la eficiencia que presenta al operar sobre un sistema que inicialmente es controlado con un PID clásico, en cuanto al tiempo de estabilización y reducción del sobre-pico cuando se pone en marcha la planta.

1.4 Objetivos.

Dentro de los objetivos que se propone demostrar en este trabajo es la flexibilidad que presenta el diseño del controlador difuso ya que durante su implementación se pueden realizar cambios para corregir resultados no deseados sin necesidad de intervenir sobre la planta o sistema.

El aporte del conocimiento del experto cumple un papel fundamental para el desarrollo del presente trabajo, puesto que su conocimiento sobre el funcionamiento de la planta nos permite operar sobre las entradas de tal forma que la salida se apegue en gran medida al requerimiento del sistema o a los valores de referencia.

Finalmente se demostrará mediante el análisis de las respuestas obtenidas de la simulación del sistema, que el controlador clásico PID es superado por un controlador difuso actuando bajo las mismas condiciones.

Entre los objetivos específicos están:

- Usar el conocimiento del experto y los datos obtenidos del controlador PID para desarrollar nuestro controlador Fuzzy.

- Optimización del controlador difuso mediante la definición de reglas de inferencia, funciones de membresía y sus rangos de operación.
- Demostrar la superioridad del controlador Fuzzy mediante el análisis comparativo entre los dos controladores.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Identificación de Sistemas.

Se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales recogidos de la planta bajo estudio. Los modelos obtenidos mediante técnicas de identificación tienen, sin embargo, las siguientes desventajas:

Su rango de validez suele ser limitado (sólo son aplicables a un determinado punto de trabajo, un determinado tipo de entrada o un proceso concreto).

En muchos casos es difícil dar significado físico al modelo obtenido, puesto que los parámetros identificados no tienen relación directa con ninguna magnitud física. Estos parámetros se utilizan sólo para dar una descripción aceptable del comportamiento conjunto del sistema.

Con éste método el diseñador vuelve a los datos tomados de experimentos al excitar la planta y medir su respuesta. El proceso de construir modelos a partir de datos experimentales es llamado identificación de sistemas. El problema de la identificación de sistemas es estimar el modelo matemático de un sistema complejo basados en

la observación de datos de entrada y salida, esencialmente ajustando parámetros de un modelo dado hasta que la salida coincida tan bien como fuera posible con los datos medidos.

En la práctica, lo ideal es recurrir a una mezcla de ambos métodos de modelado para obtener el modelo final. El uso de datos reales para identificar los parámetros del modelo provee a éste de una gran exactitud, pero el proceso de identificación se ve tanto más facilitado cuanto mayor sea el conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.

2.1.1 Proceso de Identificación.

En términos generales, el proceso de identificación comprende los siguientes pasos:

- 1. Obtención de datos de entrada – salida:** Para ello se debe excitar el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.
- 2. Tratamiento previo de los datos registrados:** Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones que puede ser necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se trata, por tanto, de ‘preparar’ los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.

3. Elección de la estructura del modelo: Si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.

4. Obtención de los parámetros del modelo: A continuación se procede a la estimación de los parámetros de la estructura que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.

5. Validación del modelo: El último paso consiste en determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:

- a) El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
- b) La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
- c) El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

Dependiendo de la causa estimada, deberá repetirse el proceso de identificación desde el punto correspondiente.

2.2 Métodos de Control.

Existen métodos y estrategias para realizar la acción de control, los métodos de control (clásico y moderno) permiten al controlador reaccionar mandando una señal correctiva del error, mientras que las estrategias de control hacen más eficiente a la labor de control, ahorrando recursos y tiempo. [1]

2.2.1 Control Clásico.

La teoría del control clásico tiene su fundamento en el conocimiento de la dinámica de la planta que se desea controlar, esta dinámica normalmente se expresa en términos de ecuaciones diferenciales, y en el caso de sistemas lineales por la transformada de LaPlace, que además sirve para encontrar una relación entre la salida y la entrada del sistema que es conocida como función de transferencia [1].

Considerando el caso de un sistema de una entrada y una salida, la dinámica de un sistema de puede representar como en la Figura 2.1.

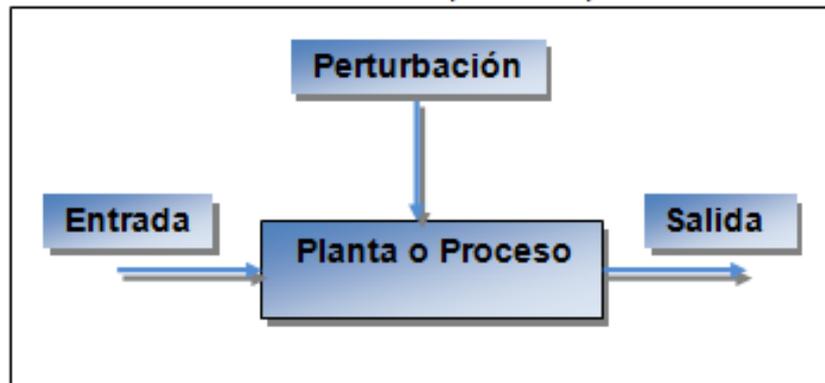


Figura 2.1 Diagrama de bloques de un Sistema.

La función de transferencia es una relación matemática entre la salida y la entrada haciendo uso de la transformada de Laplace y puede ser representada por la ecuación 1.4.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = K \frac{(s + z_1)(s + z_2) \dots (s + z_n)}{(s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_n)} \quad (1.4)$$

2.2.1.1 Métodos de Control Clásico.

2.2.1.1.1 Controlador Proporcional (P).

Es un control que se basa en la ganancia aplicada al sistema, se basa en el principio de que la respuesta del controlador deber ser proporcional a la magnitud del error. No corrige ni elimina perturbaciones, puede atenuar o aumentar la señal de error. Se representa a través del parámetro K_p y define la fuerza o potencia con que el controlador reacciona frente a un error.

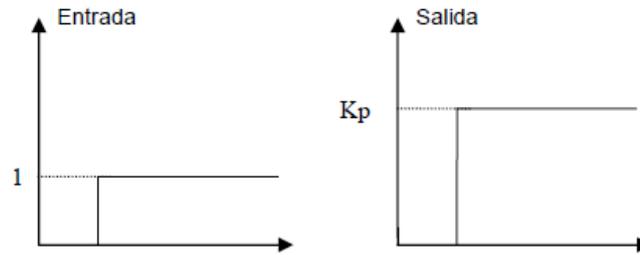


Figura 2.2 Representación del Controlador Proporcional.

2.2.1.1.2 Controlador Integral (I).

Conocido como RESET. Este tipo de controlador anula errores y corrige perturbaciones, mediante la búsqueda de la señal de referencia, necesita de un tiempo T_i para localizar dicha señal. Se representa mediante el término K_i que es el coeficiente de acción integral y es igual a $1/T_i$.

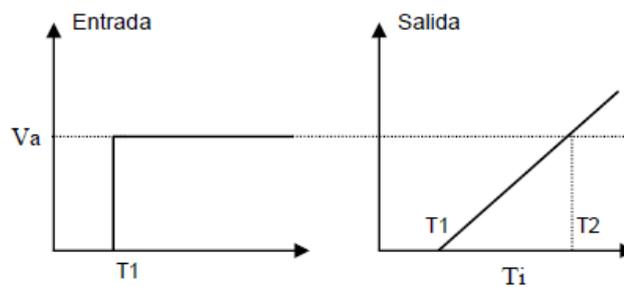


Figura 2.3 Representación del Controlador Integral.

2.2.1.1.3 Controlador Derivativo (D).

Conocido como RATE. Este controlador por sí solo no es utilizado, necesita estar junto al proporcional y al integral. Sirve para darle rapidez o aceleración a la acción de control. Necesita de un diferencial de tiempo T_d para alcanzar la señal de referencia, se representa mediante el término K_d que es el coeficiente de acción derivativa y es igual a $1/T_d$.

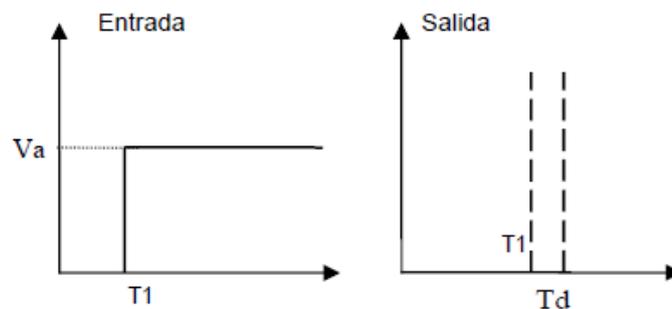


Figura 2.4 Representación del Controlador Derivativo.

2.2.1.1.4 Controlador Proporcional-Integral (PI).

Actúa en forma rápida, tiene una ganancia y corrige el error, no experimenta un offset en estado estacionario. La aplicación típica es en el control de temperatura.

Función de Transferencia: $K_p + \frac{1}{sT_i}$

2.2.1.1.5 Controlador Proporcional-Derivativo (PD).

Es estable, y reduce los retardos, es decir es más rápido. Es usado típicamente para el control de flujo de minerales.

Función de Transferencia: $Kp + sTd$

2.2.1.1.6 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

Este controlador es el más completo y complejo, tiene una respuesta más rápida y estable siempre que esté bien sintonizado.

Resumiendo se puede decir que:

- El control proporcional actúa sobre el tamaño del error.
- El control integral rige el tiempo para corregir el error.
- El control derivativo le brinda la rapidez a la actuación.

Función de Transferencia: $Kp + \frac{1}{sTi} + sTd$

2.2.2 Control Avanzado.

Los métodos de control avanzado son aquellos que actúan en forma preventiva, de modo tal que en base a los datos tomados, actúan de tal manera que previenen la ocurrencia de error, por tanto el controlador está ajustando sus parámetros constantemente.

2.2.2.1 Métodos de Control Avanzado.

2.2.2.1.1 Control Adaptivo.

Es una variante del control anticipatorio, en donde la respuesta del controlador varía automáticamente basado en los cambios de las condiciones dentro del proceso, es decir, la respuesta del controlador será variable dependiendo del comportamiento actual del proceso. Para que se lleve a cabo esta adaptación se requiere de algoritmos matemáticos que simulen el proceso en base a los datos tomados en el instante mismo en que se realiza la acción, este resultado va a generar una señal compensadora que garantizará la confiabilidad del sistema.

2.2.2.1.2 Control Optimal.

El control optimal busca la performance en la acción de control, tiene por objetivo buscar una o varias soluciones que cumplan con ciertas restricciones impuestas por el problema y que a la vez cumpla con una función objetivo (función de costo), la cual puede ser maximizar o minimizar dicha función. El control permite diversas soluciones para un mismo problema, pero el control optimal busca dentro de esas soluciones la más adecuada para cumplir con los requisitos planteados.

2.2.2.1.3 Control Robusto.

El control robusto es aquel que va a permitir mantener la acción de control pese a perturbaciones externas e internas. Puede existir perturbaciones externas como ruido y vibraciones propias del proceso; o perturbaciones internas como un mal modelamiento matemático, sistemas no lineales difíciles de linealizar, incertidumbre en el accionar o respuesta de la planta frente a estímulos, entre otros. El control robusto se resume a identificar y controlar la incertidumbre en los parámetros y en el comportamiento de una planta.

2.2.2.1.4 Control en Tiempo Real.

Se define el control de sistemas en tiempo real, al control realizado en un intervalo de tiempo finito y constante, es decir que la información será censada con muestras intermitentes pero todas las veces con un mismo tiempo de muestreo.

2.2.2.1.5 Control Difuso.

Se basa en la lógica difusa, la cual a diferencia de la lógica binaria o booleana (verdadero / falso ó 1 / 0), asigna valores intermedios dentro de esta escala. Utiliza la experiencia del operador para generar una lógica de razonamiento para el controlador.

No requiere del modelamiento matemático de la planta, puede representar modelos de sistemas lineales y no lineales mediante el uso de variables lingüísticas y una serie de condiciones o reglas previamente definidas. Sus algoritmos (reglas) hacen uso de instrucciones IF THEN.

2.2.2.1.6 Control Neuronal.

Hace uso de neuronas de inteligencia artificial. La neurona artificial estándar es un elemento de procesamiento que calcula una salida multiplicando su vector de entradas por un vector de pesos y este resultado es aplicado a una función de activación; un conjunto de neuronas conforman una red neuronal. Las Redes Neuronales son parte de la Inteligencia Artificial (AI) caracterizadas por su capacidad de aprendizaje, su velocidad mediante el procesamiento masivo en paralelo de datos y por la facilidad de modelado de sistemas y controladores no lineales.

2.2.2.1.7 Algoritmos Genéticos.

Este método simula la evolución natural de las especies propuesta por Charles Darwin, fue ideado por John Holland en 1970. La información va sufriendo cambios igual que lo harían las especies, es decir se van

adaptando al entorno, lo cual se lleva a cabo por medio de los procesos de selección natural, mezcla, y mutación. En cada ciclo (iteración) una parte del conjunto de hipótesis conocido como población actual, es reemplazado por una nueva población mediante las funciones evolutivas anteriores. Así sucesivamente en cada ciclo la población es evaluada en base a una función evolutiva, siendo conservados los datos más exactos, y siendo eliminados los datos que presentan error (selección natural). Para conservar el número de individuos (datos) estos son mezclados, lo cual genera nuevos individuos similares a sus procreadores. Finalmente cada cierto tiempo o dada cierta cantidad de individuos, algunos de los nuevos individuos son mutados aleatoriamente, pudiendo ser conservados o eliminados en la próxima iteración dependiendo de su utilidad dentro del sistema.

2.2.2.1.8 Sistemas Expertos.

Estos sistemas tratan de emular la experiencia adquirida por uno o más seres humanos a lo largo del tiempo para realizar un trabajo. Este sistema tendrá en su memoria una base de datos con múltiples soluciones a un mismo problema, luego el sistema tendrá que escoger de entre esas soluciones a la que pueda aplicarse a fin de lograr los mejores resultados. El sistema se crea basándose en las experiencias humanas, la elección de la estructura de control dependerá de las

características del trabajo en donde se aplicará, además el sistema podrá ir aprendiendo con el tiempo y almacenar sus propias experiencias, existe mucha analogía entre los sistemas expertos y los sistemas neuro-fuzzy.

2.3 Lógica Difusa.

En el mundo en que vivimos existe mucho conocimiento vago, impreciso, incierto, ambiguo, inexacto, o probabilístico por naturaleza. El razonamiento y pensamiento humano frecuentemente implica información de este tipo, probablemente originada de la inexactitud inherente de los conceptos humanos y del razonamiento basado en experiencias similares pero no idénticas a experiencias anteriores.

En la lógica convencional tenemos un conjunto de enunciados que solo pueden ser verdaderos o falsos, si o no, 0 o 1, que en búsqueda de la precisión, intentan ajustar el mundo real a modelos matemáticos rígidos y estáticos, perdiendo con ello información valiosa.

En el contexto de la lógica difusa, se utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas, es decir, es la lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre dos

extremos, la verdad absoluta y la falsedad total, por ejemplo en un día veraniego la frase “la temperatura está muy alta” no es ni verdadera ni falsa, ya que es una idea cualitativa que representa una opinión más que un hecho objetivo. La lógica difusa permite tratar información imprecisa, como estatura media o temperatura baja, en términos de conjuntos borrosos a los que los objetos pertenecen con un cierto grado de pertenencia, de manera que la transición de un conjunto a otro es suave; esto significa que un mismo objeto pertenece a varios conjuntos con distinto grado de pertenencia a cada uno de ellos.

La lógica difusa permite representar el conocimiento común, que es mayoritariamente del tipo lingüístico-cualitativo y no necesariamente cuantitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellos. [4]

2.3.1 Breve historia y aplicaciones.

El concepto de lógica difusa fue concebido a mediados de los años sesenta por Lofti Zadeh, ingeniero eléctrico iraní y profesor de la Universidad de California, en Berkeley, quien inconforme con los conjuntos clásicos (crisp sets) que sólo permiten dos opciones, la pertenencia o no de un elemento a dicho conjunto la presentó como

una forma de procesar información permitiendo pertenencias parciales a unos conjuntos que en contraposición a los clásicos los denominó Conjuntos Difusos (fuzzy sets), el concepto de conjunto difuso fue expuesto por Lofti Zadeh en un paper hoy clásico en la literatura de la lógica difusa en el año de 1965, el artículo se titula "Fuzzy Sets" y fue publicado en la revista "Information and Control". El mismo Zadeh publica en 1971 el artículo, "Quantitative Fuzzy Semantics", en donde introduce los elementos formales que acabarían componiendo el cuerpo de la doctrina de la lógica difusa y sus aplicaciones tal como se conocen en la actualidad. [2]

Más tarde, en 1974 Ebrahim Mamdani aplica los conceptos de lógica difusa en el control de procesos y desarrolla el primer control difuso para la regulación de un motor de vapor, pero la primera implantación real de un controlador de este tipo fue realizada en 1980 por F.L. Smidth & Co. en una planta cementera en Dinamarca.

En 1985 Takagi y Sugeno aportan a la teoría del control difuso un nuevo método llamado Takagi-Sugeno-Kang (TSK), como alternativa del método Mamdani, desarrollan la primera aproximación para construir reglas fuzzy a partir de datos de entrenamiento, y aunque en un principio no tiene mucha repercusión, más tarde será el punto de partida para investigar la identificación de modelos fuzzy. Otro de los

factores que contribuye a seguir con la investigación en este campo es el creciente interés en las redes neuronales y su similitud con los sistemas fuzzy; la tendencia es buscar vías de relación entre las dos técnicas y los resultados son los llamados neuro-fuzzy systems, sistemas fuzzy que usan métodos de aprendizaje basados en redes neuronales para identificar y optimizar sus parámetros.

El profesor Zadeh menciona que la gente no requiere información numérica precisa del medio que lo rodea para desarrollar tareas de control altamente adaptable por ejemplo conducir un automóvil o caminar por una acera sin chocarse con los postes y las otras personas. Si los controladores convencionales, en esencia realimentados, se pudieran programar para aceptar entradas con ruido e imprecisas ellos podrían trabajar de una manera más eficiente y quizás se podrían implementar más fácilmente. En Estados Unidos principalmente por razones culturales, el concepto de lógica difusa no tuvo mucho impacto mientras en oriente específicamente los japoneses y algunos países europeos aceptaron sin complicación esta idea y han estado desde la década de los 80 construyendo aplicaciones reales y productos que funcionan basados en lógica difusa. Por ejemplo en 1986 Yamakawa publica el artículo, "Fuzzy Controller hardware system" y desarrolla controladores difusos en

circuitos integrados. En 1987, se inaugura en Japón el subterráneo de Sendai, uno de los más espectaculares sistemas de control difuso creados por el hombre. Desde entonces, han sido infinidad los productos lanzados al mercado que usan tecnología borrosa, muchos de ellos utilizando la etiqueta fuzzy como símbolo de calidad y prestaciones avanzadas.

2.3.2 Conjuntos difusos.

La necesidad de trabajar con conjuntos difusos surge del hecho que existen conceptos que no tienen límites claros. Un conjunto difuso se encuentra asociado por un valor lingüístico que está definido por una palabra, etiqueta o adjetivo. En los conjuntos difusos la función de pertenencia puede tomar valores del intervalo entre 0 y 1, y la transición del valor entre cero y uno es gradual y no cambia de manera instantánea como pasa con los conjuntos clásicos [4]. Un conjunto difuso en un universo de discusión puede definirse como muestra la ecuación:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\}$$

Donde $\mu_A(x)$ es la función de pertenencia de la variable x y U es el universo de discurso. Cuando más cerca este la pertenencia del

conjunto A al valor de 1, mayor será la pertenencia de la variable x al conjunto A.

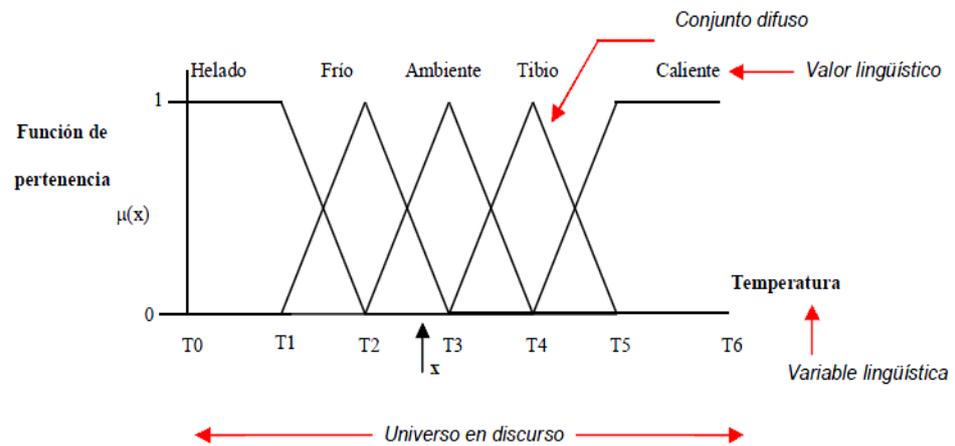


Figura 2.5 Conjunto Difuso "Temperatura".

2.3.3 Funciones de pertenencia.

Las funciones de pertenencia nos permiten representar gráficamente un conjunto difuso. En el eje "x" (abscisas) se representan el universo de discurso, mientras que en el eje "y" (ordenadas) se sitúan los grados de pertenencia en el intervalo 0 y 1.

Para definir un conjunto difuso, se puede utilizar cualquier función, sin embargo, hay ciertas funciones que son más frecuentemente usadas debido a su simplicidad matemática, entre ellas podemos mencionar las funciones tipo triangular, trapezoidal y gaussiana.

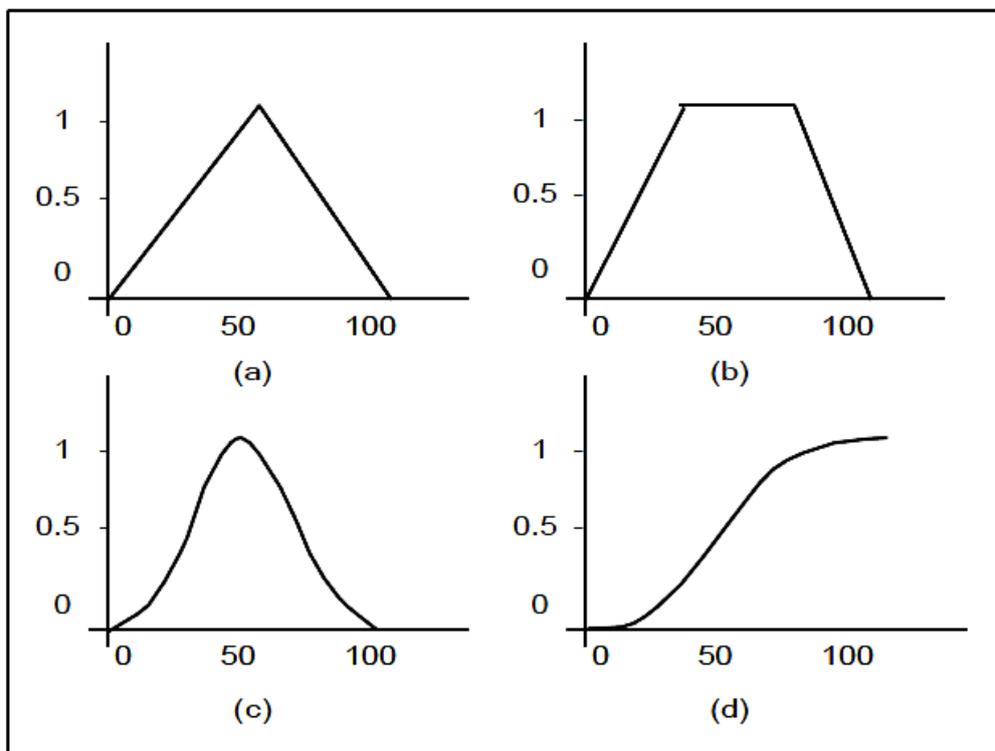


Figura 2.6 Funciones de pertenencia más habituales: (a) Triangular, (b) Trapezoidal, (c) Gaussiana, (d) Sigmoidal

El número de funciones características asociadas a una misma variable es elegido por el experto: a mayor número de funciones características tendremos mayor resolución pero también mayor complejidad computacional; además estas funciones pueden estar solapadas o no, el hecho de estar solapadas pone de manifiesto un aspecto clave de la lógica difusa: una variable puede pertenecer con diferentes grados a varios conjuntos difusos a la vez.

2.3.4 Universo de discusión.

Los elementos de un conjunto difuso son tomados de un universo de discurso. El universo contiene todos los elementos que pueden estar dentro de los valores que puede presentar una variable.

2.3.5 Operaciones con conjuntos difusos.

Los Conjuntos Difusos se pueden operar entre sí del mismo modo que los conjuntos clásicos. Puesto que los primeros son una generalización de los segundos, es posible definir las operaciones de intersección, unión y complemento, pero debido a la naturaleza diferente de ellos la formulación de estas operaciones es algo especial.

En la figura 2.7, se muestran dos conjuntos difusos los cuales nos servirán para definir las operaciones fundamentales que entre ellos se pueden realizar.

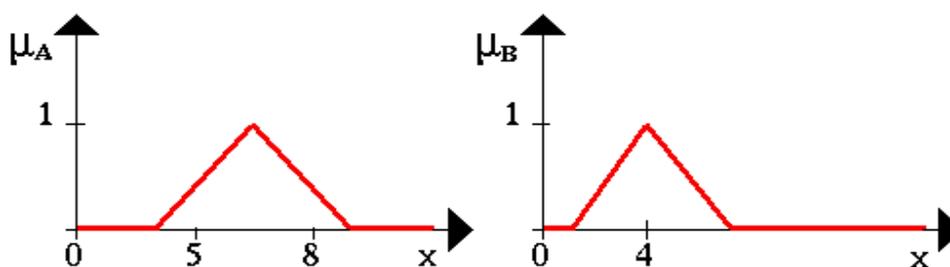


Figura 2.7 Conjuntos difusos entre los que se definirán las operaciones.

2.3.5.1 Intersección.

La idea intuitiva de intersección heredada de los conjuntos clásicos expresa que el conjunto intersección de dos conjuntos A y B, se define como los elementos que están en el conjunto A “Y” en el conjunto B; de esta manera la intersección entre conjuntos se puede entender como una operación tipo AND entre los mismos.

Siguiendo esta idea, se podría graficar la intersección de los conjuntos difusos mostrados en la figura 2.8.

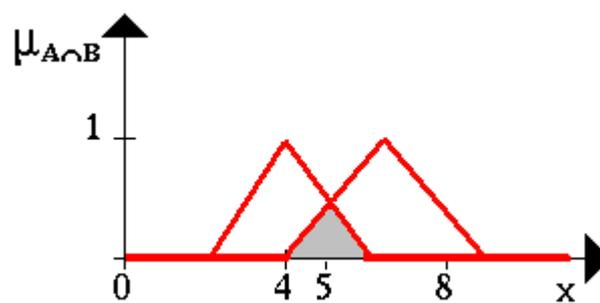


Figura 2.8 Intersección entre dos conjuntos difusos.

2.3.5.2 Unión.

La idea intuitiva de unión heredada de los conjuntos clásicos expresa que el conjunto unión de dos conjuntos A y B, se define como los elementos que están en el conjunto A “O” están en el conjunto B. de esta manera la intersección entre conjuntos se puede entender como una operación tipo OR entre los mismos.

Siguiendo esta idea, se podría graficar la unión de los conjuntos difusos mostrados en la figura 2.9.

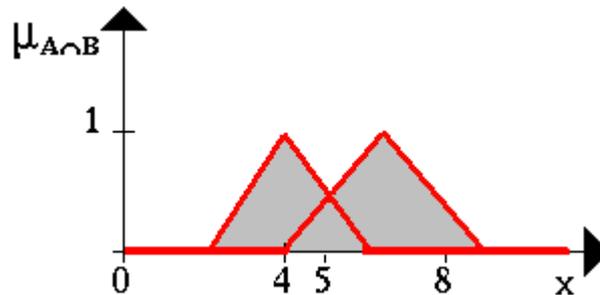


Figura 2.9 Unión entre dos conjuntos difusos.

2.3.5.3 Complemento.

En conjuntos clásicos se define el complemento como el conjunto de los elementos que le faltan a un conjunto para ser igual al conjunto universo.

De la misma manera en conjuntos difusos se habla del complemento como el conjunto formado por los valores de pertenencia que le permitirían al conjunto obtener el valor máximo de pertenencia posible, siendo 1 el valor máximo de pertenencia que un conjunto difuso puede suministrar, este conjunto se podría formar restándole a 1 los valores de pertenencia del conjunto difuso al que se desea encontrar el complemento.

Gráficamente esto se visualiza así:

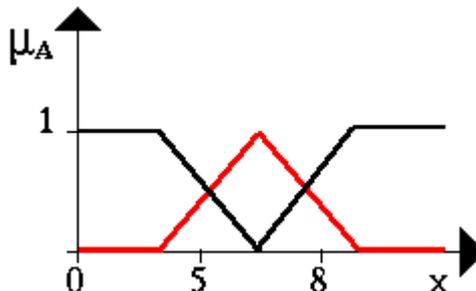


Figura 2.10 Complemento de un conjunto difuso.

Dado que los conjuntos difusos no se particionan en el mismo sentido que los conjuntos Booleanos, estas operaciones son aplicadas al nivel de pertenencia, como una consecuencia de los conjuntos difusos. Decidir si un valor es o no es miembro de cualquier conjunto difuso en particular, requiere algunas nociones de cómo está construido el conjunto, del universo y de los límites de éste.

2.3.6 Variables y modificadores lingüísticos.

La Teoría de Conjuntos Difusos puede utilizarse para representar expresiones lingüísticas que se utilizan para describir conjuntos o algoritmos. Los Conjuntos Difusos son capaces de captar por sí mismos la vaguedad lingüística de palabras y frases comúnmente aceptadas, como "medianamente alto" o "ligero cambio". La habilidad

humana de comunicarse mediante definiciones vagas o inciertas es un atributo importante de la inteligencia.

Una Variable Lingüística es aquella variable cuyos valores son palabras o sentencias que van a enmarcarse en un lenguaje predeterminado. Para estas variables lingüísticas se utilizará un nombre y un valor lingüístico sobre un Universo de Discurso. Además, podrán dar lugar a sentencias generadas por reglas sintácticas, a las que se les podrá dar un significado mediante distintas reglas semánticas. Los Conjuntos Difusos pueden utilizarse para representar expresiones tales como:

- X es PEQUEÑO.
- La velocidad es RÁPIDA.
- La temperatura es ALTA.

Las expresiones anteriores pueden dar lugar a expresiones lingüísticas más complejas con el uso de adverbios gramaticales como muy, poco, medio, etc. que en términos de Lógica Difusa se conocen como modificadores lingüísticos, los cuales permiten cuantificar el grado de pertenencia de una variable a un Conjunto Difuso:

- X no es PEQUEÑO.
- La velocidad es medianamente RÁPIDA.

- La temperatura es muy ALTA.

Así, se pueden ir complicando las expresiones. Por ejemplo, la expresión "x no es PEQUEÑO" puede calcularse a partir de la original calculando el complemento de la siguiente forma:

$$\mu \text{ no es PEQUEÑA } (x) = 1 - \mu \text{ PEQUEÑO } (x)$$

Tratando de esta forma los distintos modificadores lingüísticos (muy, poco, rápido, lento, medio...) pueden ir calculándose todas las expresiones anteriores.

2.4 Control Difuso

Los controladores difusos son las aplicaciones más importantes de la teoría borrosa. Ellos trabajan de una forma bastante diferente a los controladores convencionales que se fundamentan en complejos modelos matemáticos; el conocimiento experto se usa en vez de ecuaciones diferenciales para describir un sistema. Este conocimiento puede expresarse de una manera muy natural, empleando las variables lingüísticas que son descritas mediante conjuntos difusos.

En general, los controladores difusos son sistemas expertos que emplean el conocimiento como fundamento, expresado en términos de reglas difusas y de un proceso de inferencia para resolver un problema de control dado [5].

Los controladores fuzzy, al igual que los controladores clásicos, toman el valor de las variables de entrada, procesan y actúan sobre sus salidas a fin de controlar la planta; la principal diferencia entre ellos radica en la capacidad que tienen los controladores difusos de utilizar el conocimiento obtenido de un operador humano. Este conocimiento es complicado de expresar en términos precisos, sin embargo una descripción lingüística imprecisa de la forma en que se realiza el control puede ser realizada por el operador con relativa facilidad. Esta descripción lingüística consiste de un conjunto de reglas que hacen uso de proposiciones difusas, el controlador difuso evalúa la veracidad de cada regla, y así, toma decisiones sobre los cambios a realizar en las variables de salida que producirán un cambio sobre la planta.

Un controlador difuso está formado por cuatro módulos: la base de reglas difusas, un proceso de inferencia de reglas, un módulo de fusificación y otro de defusificación.

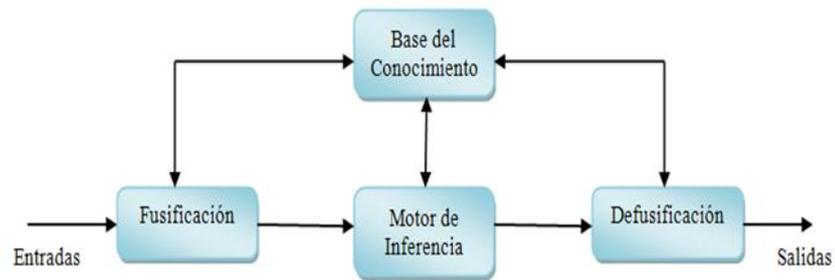


Figura 2.11 Estructura de un Controlador Difuso.

2.4.1 Fusificación.

La primera tarea de un controlador lógico difuso (FLC) es traducir el valor medido en términos de valores lingüísticos. El proceso consiste en la medición de las variables de entrada al controlador realizando un mapeo a escala que transforma el rango de valores de las variables de entrada en los correspondientes valores lingüísticos en el universo de discurso [4].

En la fusificación de las entradas se hace una lectura de las señales de nivel y flujo, las cuales se codifican de tal forma que queden en términos de los conjuntos difusos, como se muestra en la figura 2.12. Así, en esta etapa se determina su correspondiente grado de pertenencia.

Se puede concluir entonces que la Fusificación es la transformación de las informaciones determinística enviada del proceso al controlador difuso en información cualitativa que toma como referencia conjuntos difusos y variables difusas [4].

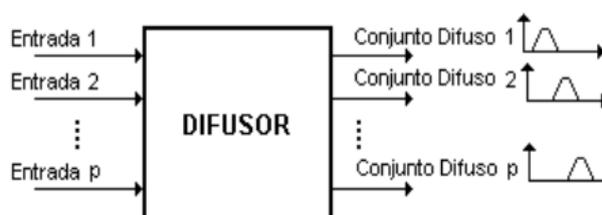


Figura 2.12 Fusificación de Entradas.

2.4.2 Base de conocimiento.

La base de conocimiento consiste en una base de datos y otra de reglas. La base de datos proporciona las definiciones necesarias para las reglas de control y la manipulación de los datos difusos. El número máximo de reglas viene dado por el producto de números de particiones de todas las variables lingüísticas de entrada al controlador difuso. Para hablar de una base de reglas, es preciso elegir cuáles variables se tomarán como entrada y cuáles como salida del controlador difuso.

2.4.3 Inferencia difusa.

El mecanismo de inferencia es la parte medular de un controlador lógico difuso ya que simula la capacidad para tomar decisiones de los seres humanos, basada en conceptos y acciones de control aprendidas y empleando implicaciones y reglas de inferencia. Este proceso se resuelve mediante operaciones lógicas de disyunción, conjunción e implicación, de tal forma que la evaluación de una regla vendrá dada por un antecedente y un consecuente.

En lógica difusa existen dos tipos de estructuras de implicación, Mamdani y Takagi-Sugeno-Kang.

El método tipo Mandani utiliza reglas tipo SI-ENTONCES (IF-THEN). Una regla de la base del conocimiento tiene dos partes, el antecedente y el consecuente como se muestra en la figura 2.13. En un sistema tipo Mandani tanto el antecedente como el consecuente de las reglas son expresiones lingüísticas.

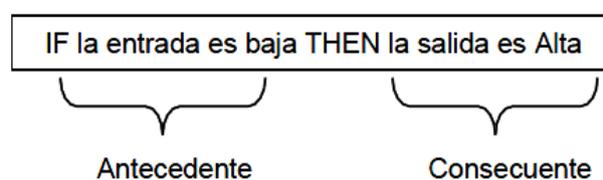


Figura 2.13 Regla tipo Mandani.

Las reglas de la base del conocimiento en un sistema tipo Takagi-Sugeno-Kang son diferentes a la de los sistemas Mandani pues el consecuente ya no es una expresión lingüística sino una función de la entrada que tenga el sistema en un momento dado.

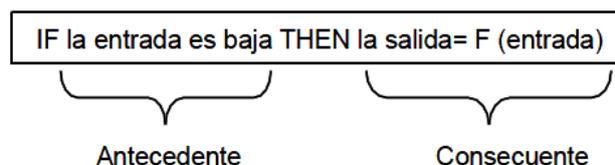


Figura 2.14 Regla tipo Takagi-Sugeno-Kang.

Las salidas que arroja el consecuente en este tipo de sistemas son valores numéricos por lo que no necesitan atravesar por una etapa de defusificación.

2.4.4 Defusificación.

La defusificación es un proceso matemático utilizado para convertir un número difuso en un número real. Este es un paso necesario porque los resultados difusos generados por la inferencia difusa deberá ser de alguna manera matemáticamente combinado para generar valores simples en la salida del modelo del control difuso ya que los actuadores son parte de los sistemas de control que aceptan sólo valores reales. Existen diversas alternativas para transformar un valor difuso en real, las más empleadas son:

Método del centroide: utiliza como salida del sistema el centro de gravedad de la función característica de salida. Es el método más utilizado en aplicaciones de la lógica difusa a la ingeniería ya que se obtiene una solución única, aunque a veces es difícil de calcular.

$$y = \frac{\int \mu_c(z)z dz}{\int \mu_c(z) dz}$$

Fórmula para el cálculo del centroide.

Método del máximo: se elige como valor para la variable de salida aquel para el cual la función característica del conjunto difuso de salida es máxima. En general no es un método óptimo, ya que este valor máximo puede ser alcanzado por varias salidas.

2.5 Tipos de Controladores Difusos.

Los controladores difusos se pueden clasificar en tres tipos:

- Modelo Mamdani
- Modelo Takagi-Sugeno-Kang
- Modelo de Tsukamoto

La diferencia que mantienen estos tipos de controlador difuso es en la consecuencia de las reglas: en el primero, la consecuencia es un conjunto difuso, para el segundo es una función lineal de las entradas

y para el tercero es una función monótona a partir de los niveles de activación de las reglas.

2.5.1 Controlador tipo Mandani.

En este tipo de controlador, los consecuentes de las reglas son cambios en la acción de control, dichos cambios se representan mediante términos lingüísticos o numéricos fijos, son del tipo:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y } \dots \text{ y } X_n \text{ es } A_n \text{ entonces } U \text{ es } U_i$$

Así el consecuente de la regla es un conjunto difuso, dicho conjunto expresa el significado de un conjunto de estados de la variable de salida. Este modelo es sencillo de interpretar ya que emplea las etiquetas lingüísticas en el consecuente. [7]

2.5.2 Controlador tipo Takagi-Sugeno.

En este modelo se incorpora al consecuente diferentes maneras de actuación sobre la variable de salida, mediante la definición de funciones numéricas de las entradas, el modelo se representa de la siguiente forma:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y } \dots \text{ y } X_n \text{ es } A_n \text{ entonces } U \text{ es } f(X_1, \dots, X_n)$$

Donde f es la función lineal $f(X_1, \dots, X_n) = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_nX_n$ Cuando el grado del polinomio es la unidad, al sistema se le llama “Modelo de primer orden de Sugeno”. Cuando la función es una constante, el

sistema es equivalente al modelo Mamdani con consecuentes no difuso. Si la función no es una constante, se dice que los consecuentes de las reglas son conjuntos difusos puntuales llamados singletons.

Es importante considerar que para el diseño de un controlador Takagi-Sugeno se necesita un conocimiento cuantitativo de la planta, en cambio para el tipo Mamdani se necesita un conocimiento mucho más empírico.[8]

2.5.3 Controlador tipo Tsukamoto

El modelo de Tsukamoto [9] sólo cambia la forma del consecuente utilizando una función monótona creciente (o decreciente) $g(\alpha)$ que emplea como entrada el nivel de activación de la regla α . Con lo que la estructura del modelo de Tsukamoto es:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y } \dots \text{ y } X_n \text{ es } A_n, \text{ entonces } U \text{ es } g(\alpha)$$

En general, para las aplicaciones de control se utilizan controladores de tipo Sugeno ya que son computacionalmente más eficientes [10], aunque el modelo de Mamdani también se utiliza por ofrecer los mejores resultados en cuanto a la calidad de respuesta del sistema a controlar, ya que representa de mejor forma las decisiones del experto.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

3.1 Introducción.

El objetivo principal de un sistema de control automático es manipular el elemento de control de manera tal que debe mantener la salida de la planta en un nivel de referencia deseado, manteniendo la salida en este valor a pesar de las perturbaciones del sistema. El algoritmo de control debe ser diseñado de manera tal que cuando se altere la referencia, la salida del sistema busque este valor deseado con un tiempo de estabilización mínimo y además presente un porcentaje de sobre-pico aceptable. El controlador también permite prevenir la inestabilidad del sistema en lazo cerrado.

3.2 Identificación de sistemas.

Para la implementación real del controlador es necesario que el motor no supere a sus características eléctricas. Por ello para la simulación trabajamos con un ochenta y cinco por ciento tanto del voltaje nominal como de la velocidad nominal para evitar el daño del motor cuando se superan los límites de operación del mismo.

3.2.1 Características de la Planta o Proceso.

3.2.1.1 Motor de inducción.

El motor de inducción presenta las siguientes características eléctricas:

- **Potencia=** 1.5 [KW]
- **Fp=** 0.7
- **V:** $\Delta \rightarrow 220[V]$, $Y \rightarrow 380[V]$
- **I:** $\Delta \rightarrow 6,95 [A]$, $Y \rightarrow 4 [A]$
- **ω_n =** 1400[RPM]
- **Rango de operación:** 1040 – 1200 RPM

Se trabajó con el motor conectado en delta, ya que proporciona el máximo de entrega de la fuente 220V. Se usa solo el 85% de la velocidad nominal, es decir 1200 RPM, para que no sobrepase los límites del motor al momento de colocarle la carga.

Se manipula la carga de tal forma que el motor oscile entre su estado operación, el cual es como se menciona anteriormente 1040 – 1200 RPM, por lo tanto los datos que se obtienen deben de oscilar entre los 3 voltios para 1040 rpm y 3.45 voltios para 1200 rpm.

3.2.2 Configuración de la Tarjeta de datos.

- Máximo Voltaje: 5 [V].
- Mínimo Voltaje: 0 [V].
- Muestras a leer: 2 [K/muestras]

Con los datos obtenidos se procede con la función `ident` de Matlab a la identificación de sistemas (capítulo 2), la cual permite generar la función de transferencia de la planta teniendo en cuenta que se debe escoger un modelo que posea un porcentaje superior al 85% de eficiencia.

3.3 Controlador Clásico PID.

3.3.1 Criterios del diseño del controlador.

El objetivo es diseñar un controlador que no posea un sobre-pico muy elevado y que su tiempo de estabilización sea el mejor posible, debido a que los motores de inducción al hacer cambios bruscos de velocidad, generan picos que pueden influir de manera negativa en el desempeño del motor, por ende alterar su rendimiento o eficiencia, dependiendo la aplicación del motor. El controlador PID que se desarrolla debe cumplir con los siguientes parámetros:

- Plantear que la planta llegue a estabilizarse en un tiempo menor o igual a 0.7 segundos.

- Sobre-pico porcentual menor o igual al 5%. Esto permitirá que el sistema se establezca de una mejor manera y por ende menor tiempo de estabilización.

3.3.2 Pasos para obtener el controlador.

1. Primero, empleando la herramienta Sisotool de Matlab, colocamos la función de transferencia obtenida en la identificación de sistemas.

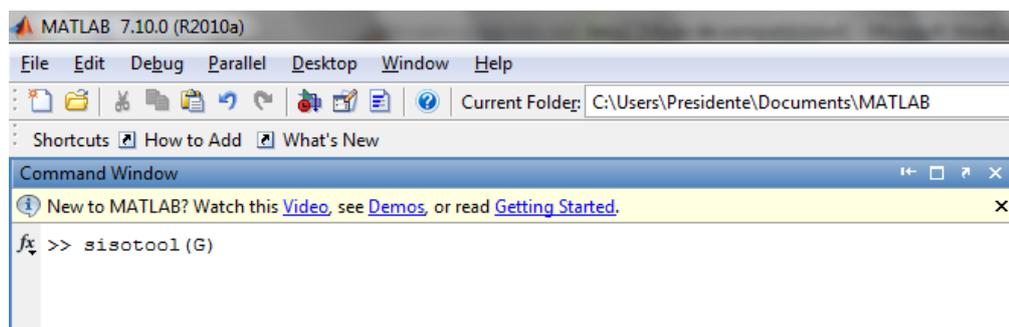


Figura 3.1 Función Sisotool.

2. Se selecciona la forma del modelo del diagrama de bloques con la cual se va a trabajar.

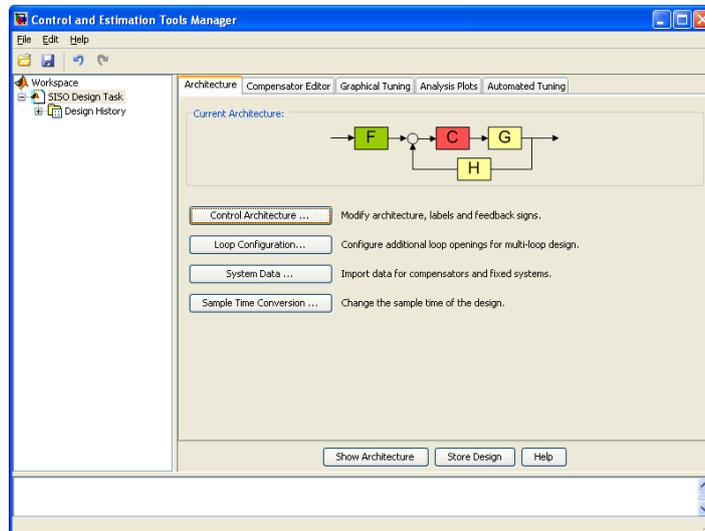


Figura 3.2 Sisotool.

3. Se selecciona la pestaña Graphical Tuning y se procede a trabajar con el editor de raíces en lazo abierto.

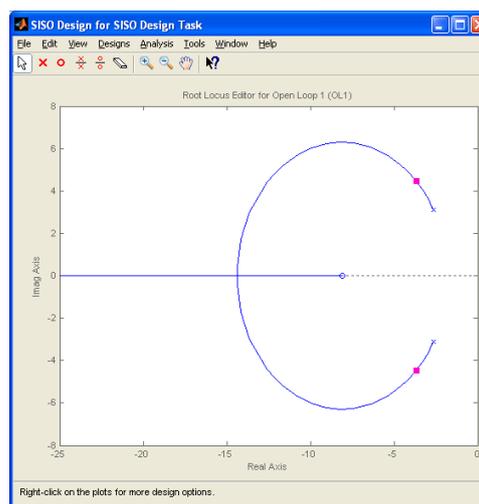


Figura 3.3 Editor de Raíces en lazo abierto.

4. Se agregan los parámetros del controlador, un sobre-pico menor o igual del 5% y un tiempo de estabilización de 0.7 segundos.

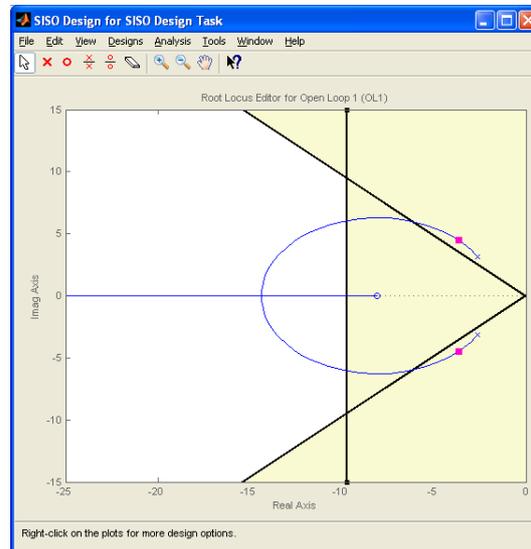


Figura 3.4 Parámetros en la trayectoria de Raíces.

5. Se aplica un integrador para reducir a cero al error de estado estacionario.

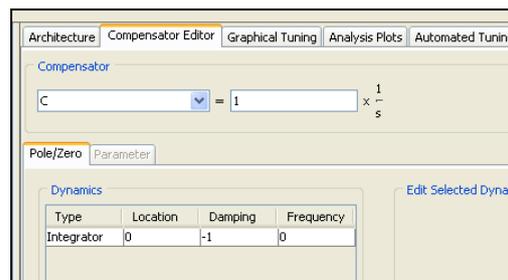


Figura 3.5 Integrador.

6. Se agrega un Cero, para cumplir con los parámetros antes mencionados, ya obteniendo un controlador PI.

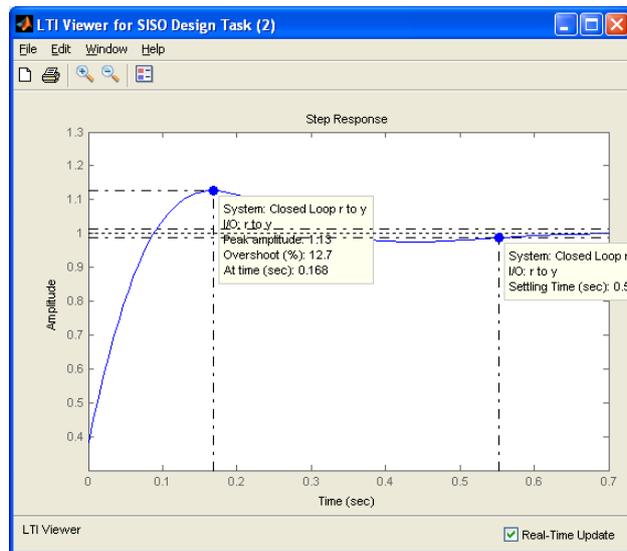


Figura 3.6 Planta con un cero.

7. Analizando los resultados obtenidos, se puede apreciar que hay la necesidad de agregar un cero adicional para así obtener el controlador PID para que cumpla los objetivos deseados.

8. Se envían los resultados al “workspace” de Matlab, para así obtener las constantes del controlador K_p , K_i y K_d .

La forma general del controlador es:

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d(s)$$

El controlador es el siguiente:

$$\frac{0.53492(s + 11.11)(s + 25.32)}{s}$$

$$\frac{0.3492s^2 + 19.48715s + 150.4758}{s}$$

$$19.48714 + \frac{150.4758}{s} + 0.53492s$$

Entonces:

$$K_p = 19.48714.$$

$$K_i = 150.4758.$$

$$K_d = 0.53492.$$

3.4 Controlador Lógico Difuso (CLF).

Como se expuso en el capítulo anterior la Lógica Difusa permite la introducción de valores intermedios para evaluar la lógica convencional binaria, con la finalidad de emular el razonamiento humano para la toma de decisiones en los sistemas computacionales.

Un controlador lógico difuso tiene la capacidad de utilizar una estrategia de operación empírica para establecer una operación de control automático. La gran ventaja de aplicar la lógica difusa en un sistema de control es su alta adaptabilidad, flexibilidad y convergencia para el diseño de aplicaciones que permitan a las máquinas respondan con mayor inteligencia a la imprecisión y a las condiciones

del mundo real, buscando imitar el raciocinio humano. El objetivo de emplear lógica difusa en procesos de control es crear un sistema basado totalmente en el conocimiento del experto o de la persona que aporta sus conocimientos empíricos para alcanzar un óptimo funcionamiento del sistema sin necesidad de conocer el modelo del mismo.

El diseño del controlador del presente trabajo tiene un enfoque diferente al diseño tradicional de controladores difusos, en los cuales de cierta manera se busca adaptar la implementación del controlador fuzzy a los diferentes tipos de controladores tradicionales; es así que existen controladores Fuzzy-PID, Fuzzy-PI, Fuzzy-PD, Fuzzy-P, lo cual contradice el objetivo de usar Lógica Difusa para el control de sistemas, en donde se trata de reemplazar conceptos de un modelo matemático por instrucciones empíricas de control, aportadas por un operador o experto en base a su conocimiento heurístico. Es así que a diferencia de controladores difusos en los cuales sus entradas son el error y la derivada y/o la integral del error; el controlador propuesto tiene como entradas un valor medido a la salida de la planta y el error entre la consigna y el valor de retroalimentación, esto se hace con la finalidad que la acción del controlador permita establecer la salida dentro de un rango mínimo de error.

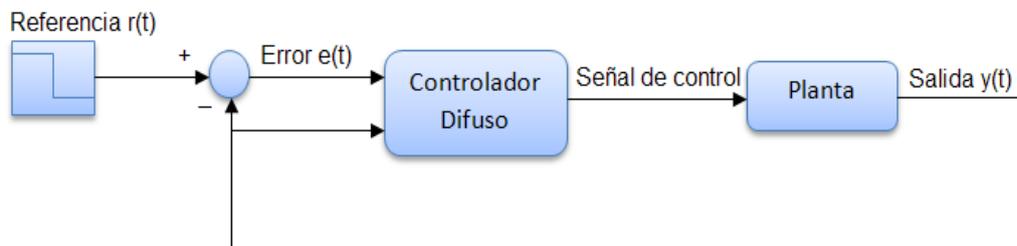


Figura 3.7 Esquema del sistema de control difuso.

El esquema de control en lazo cerrado muestra todas las partes involucradas en el sistema. El objetivo del controlador difuso es lograr que:

$$|r(t) - y(t)| < \epsilon ; \epsilon : \text{cercano a cero}$$

Donde

$r(t)$: Es la velocidad que se desea del motor

$y(t)$: Es la velocidad que desarrolla el motor

t : Es la variable tiempo

3.4.1 Definición de variables lingüísticas.

Como primer paso en el diseño del controlador difuso esta la definición de las todas las variables involucradas en el sistema, las cuales son la velocidad y el error, el número de términos lingüísticos a utilizar

depende del criterio del diseñador ya que en función de la respuesta mostrada por el controlador este número puede aumentar o disminuir, caracterizándose principalmente por el empleo de cantidades impares de valores lingüísticos, debido a la simetría en la definición y la existencia de un término central que también se debe considerar como punto de referencia.

El Universo de Discurso para la velocidad está definido por el rango de operación del motor, que para este caso se estableció entre 1040 y 1200 RPM, mientras que para el error se establece el universo de discurso entre -0.5 y 0.5. En este contexto se utilizaron cinco conjuntos difusos para las variables de entrada, velocidad y error, representadas respectivamente con la siguiente abreviatura Min, Reg, Med, Alt, Max que corresponden a los valores lingüísticos Mínima, Regular, Media, Alta, Máxima que describen la velocidad y NG, N, ZE, P, PG que describen un error Negativo Grande, Negativo, Cerca a Cero, Positivo, Positivo Grande. En una forma análoga a la velocidad, la salida que representa el voltaje de alimentación del motor, se utilizaron cinco conjuntos difusos VMB, VB, VM, VG, VMG abreviaturas que describe un voltaje Muy Bajo, Bajo, Medio, Grande y Muy Grande respectivamente, distribuidas en el universo de entre 0 y 240 Voltios.

Se definen los siguientes conjuntos difusos para la etapa de control en la señal de velocidad:

Min. : La velocidad de entrada es Mínima.

Reg. : La velocidad de entrada Regular.

Med. : La velocidad de entrada Media.

Alt. : La velocidad de entrada Alta.

Max. : La velocidad de entrada Máxima.

Para la señal del error se definen también cinco conjuntos difusos en la etapa de control:

NG : El error a la entrada es Negativo Grande.

N : El error a la entrada es Negativo.

ZE : El error a la entrada es Cercano a Cero.

P : El error a la entrada es Positivo.

PG : El error a la entrada es Positivo Grande.

Los conjuntos difusos para la variable de salida quedan representados así:

VMB : Entregar un voltaje Muy Bajo.

VB : Entregar un voltaje Bajo.

VM : Entregar un voltaje Medio.

VG : Entregar un voltaje Grande.

VMG : Entregar un voltaje Muy Grande.

3.4.2 Tipo de funciones de membresía.

Se emplearon una combinación de dos funciones de membresía, Triangular por su simplicidad de uso y poco consumo computacional y Trapezoidal para alcanzar estabilidad en los puntos críticos de cada señal.

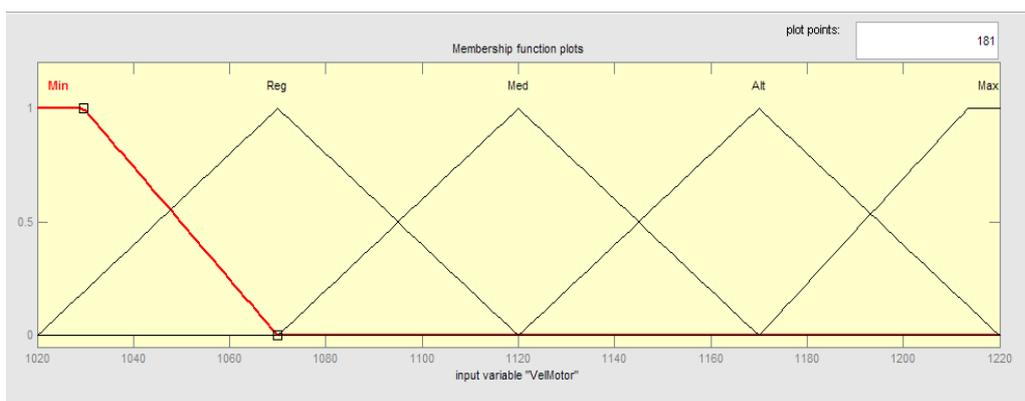


Figura 3.8 Funciones de pertenencia para la velocidad.

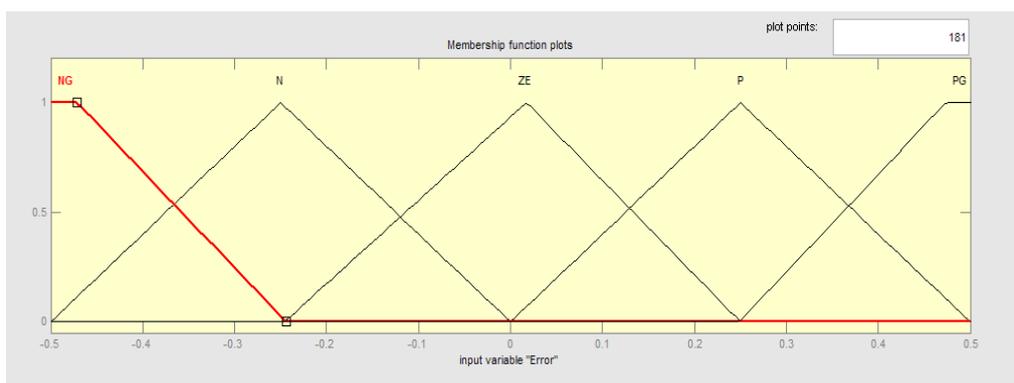


Figura 3.9 Funciones de pertenencia para el error.

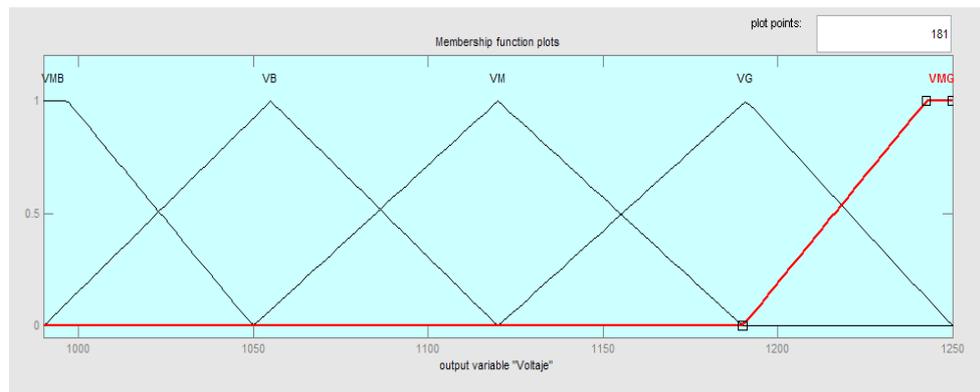


Figura 3.10 Funciones de pertenencia para el voltaje.

En las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se observa que todos los conjuntos son simétricos a los lados de una variable central, en el caso del error refleja la cercanía al estado estable. El universo de discusión de cada variable cubre toda la región y se expresa de acuerdo a las unidades de cada variable.

3.4.3 Creación de la base de reglas

La base de reglas que ejecutan el control de velocidad del motor de inducción está constituida por 25 instrucciones, obtenidas de multiplicar los conjuntos difusos de la velocidad y el error.

Vel/Error	NG	N	ZE	P	PG
Min	VMB	VMB	VB	VM	VG
Reg	VMB	VMB	VM	VG	VG
Med	VMB	VB	VM	VG	VMG
Alt	VB	VB	VM	VMG	VMG
Max	VB	VM	VG	VMG	VMG

Tabla I Reglas para el control difuso de velocidad.

La primera fila y la primera columna de la **tabla I** indican los conjuntos difusos del error y de la velocidad y las funciones de pertenencia del voltaje se muestran en el contenido de la tabla.

Cada valor en el cuerpo de la tabla es el consecuente de una instrucción SI - Y - ENTONCES:

SI Vel = Min **Y** Error = NG **ENTONCES** salida = VMB

Para el diseño de las reglas del controlador difuso se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El controlador debe actuar sobre las entradas de tal manera que la salida sea una señal que permita establecer la velocidad que

desarrolla el motor en los valores referenciales mínimo 1040 RPM y máxima 1200 RPM.

2. Si la velocidad que alcanza el motor es mínima (Vel Min) y el error es negativo N (La velocidad alcanzada por el motor es mayor que la velocidad de referencia mínima) entonces la salida entregará un voltaje Muy Bajo para que baje hasta la referencia mínima.
3. Si la velocidad es media (Vel Med) y el error está cerca a cero ZE, entonces la salida entregará un voltaje Medio.
4. Si la velocidad es máxima (Vel Max) y el error es positivo (La velocidad alcanzada por el motor es menor que la referencia) entonces la salida entregará un voltaje Muy Grande para llegar a la velocidad de referencia máxima.

El resto de reglas se establecieron teniendo como base estas consideraciones.

3.4.4 Proceso de Inferencia.

El proceso de inferencia usado es el de mínimo-máximo, también conocido como Mandani; ya que por sus características es de los métodos más apropiados para aplicaciones de control en ingeniería.

Este método se basa en lo siguiente:

- **Valores de entrada:** El resultado de la fusificación arroja ciertos valores de membresía para distintos elementos de un conjunto difuso de entrada (Vel y error). Ejemplos:

$\mu_{Vel-Max}(x) = 0.7$: El valor de membresía de la variable x , para

la entrada Vel, en el conjunto difuso Max.

$\mu_{Error-ZE}(x) = 0.3$: El valor de membresía de la variable x ,

para la entrada Error, en el conjunto difuso ZE.

- **Aplicación de reglas:** Las pertenencias que existen se aplican sobre la base de reglas, para determinar sobre que conjunto difuso de la salida se produce el consecuente de cierta combinación de antecedentes descritos en dichas reglas.

Ejemplo:

SI Vel = Min **Y** Error = NG **ENTONCES** salida = VMB

- **Membresías de salida:** El valor de membresía que se hereda al conjunto difuso de la salida en cada regla cumplida, es el valor mínimo de las membresías de los conjuntos difusos de entrada que toman parte en la regla. Ejemplo:

$\mu_{VMG}(x) = 0.5$: El valor de membresía de la variable x , para la salida voltaje, en el conjunto difuso MG.

Formación del polígono: Después de aplicar todas las reglas que se cumplen, podemos tener varios valores de membresía para un mismo conjunto difuso del espacio de salida. Para obtener el polígono final del proceso de inferencia, se debe hacer un barrido por cada conjunto difuso, tomando siempre el máximo valor de membresía que presente en cada regla. Entre conjuntos difusos se debe escoger como valor de membresía, el mayor de cada uno.

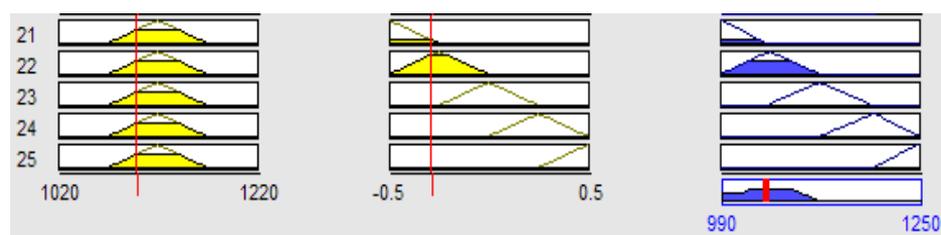


Figura 3.11 Formación del polígono de salida.

En la figura 3.11 podemos observar la formación del polígono de salida, así como también nos da una idea de los puntos anteriores. En ella, de cada renglón se toma la menor membresía de los espacios de entrada para heredar al de salida (mínimo). La última columna muestra la integración del polígono de salida, con los máximos de los mínimos, con lo cual se aplica el método de inferencia máximo-mínimo.

3.4.5 Identificación del método de defusificación.

La última parte del proceso de control difuso consiste en llevar a cabo la defusificación. El objetivo de un método de defusificación es encontrar un valor no difuso, que refleje mejor los valores difusos de la variable lingüística de salida. En el presente trabajo, el método utilizado es el del centroide, su elección se debe a la elección del método de inferencia Mandani, que es el método más usado en aplicaciones difusas usadas en control, en el que la salida final será el centro de gravedad del área total resultante, calculado con la fórmula del centroide discretizado, que es la que se implementa en la programación de controlador difuso de este proyecto.

$$y_{centroide} = \frac{\sum_{x \in X} x \mu_A(x)}{\sum_{x \in X} \mu_A(x)}$$

Fórmula para el cálculo del centroide discretizado.

El diseño del sistema, se implementó en MATLAB utilizando el Fuzzy Logic Toolbox [6].

3.5 Simulación.

En esta parte del proyecto se llevó a cabo las simulaciones del sistema con el controlador PID y del sistema con controlador FUZZY, usando la herramienta Simulink de Matlab (Figura3.12). La programación en esta herramienta es amigable ya que permitió desarrollar el esquema para la simulación gracias al gran número de bloques que posee su Toolbox.

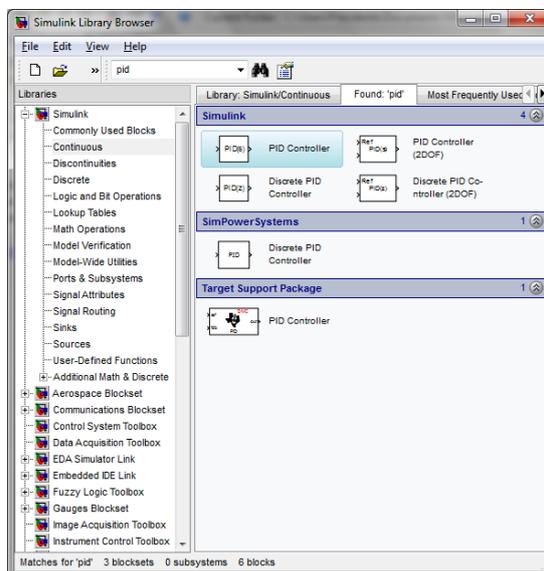


Figura 3.12 Toolbox de Simulink.

3.5.1 Simulación con controlador PID.

En la figura 3.13 se aprecia el esquema del sistema con su controlador PID acoplado a la entrada de la planta o proceso. El proceso esperado es que la salida (bloque verde claro) de la planta sea la misma a la referencia (bloque celeste) que se está aplicando al sistema.

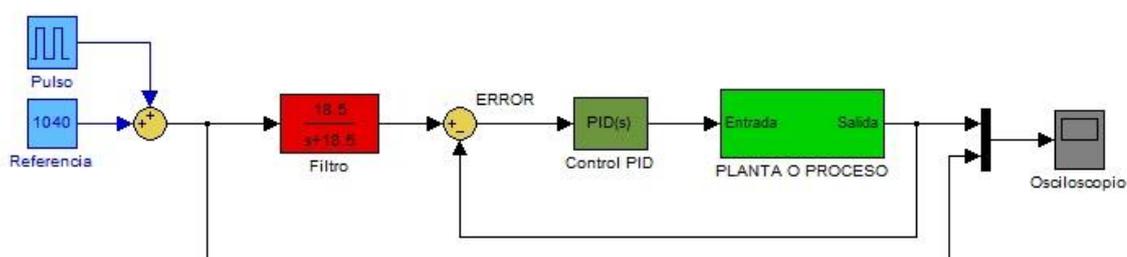


Figura 3.13 Esquema del sistema con controlador PID

En el gráfico 3.14 se observa la función de transferencia que se obtuvo del proceso de identificación de sistemas, la cual representa al motor de inducción en la simulación.

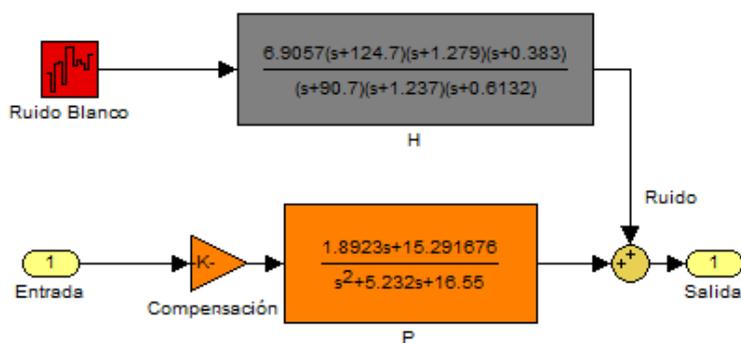


Figura 3.14 Planta o Proceso

3.5.2 Simulación con controlador FUZZY.

A continuación se presenta una explicación de cómo se realizó la simulación del proceso con el controlador FUZZY.

En la figura 3.15 se muestra el diseño del sistema empleando un controlador de lógica difusa.

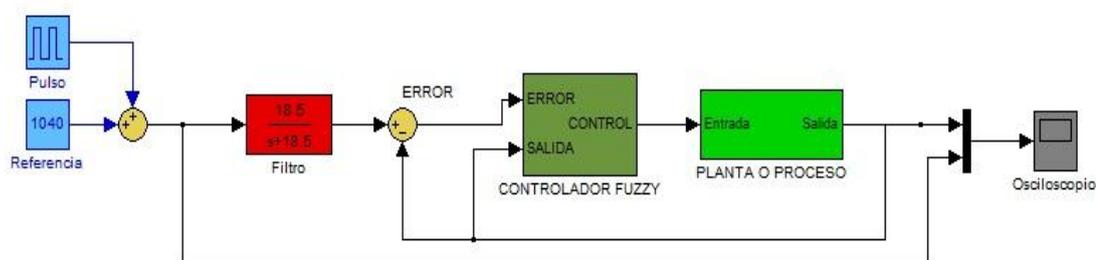


Figura 3.15 Esquema del sistema con controlador FUZZY

En la figura 3.16 se observa con más detalle el controlador FUZZY, el cual tiene como entradas el error y la señal de salida.

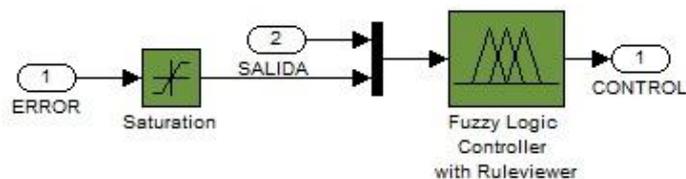


Figura 3.16 Controlador FUZZY

En la figura 3.17 se muestra el cuadro para ingreso de variables de entrada y salida para programar el controlador de lógica difusa, el cual se lo obtiene al ingresar el comando “fuzzy” en la ventana de comandos de Matlab. Como se observa en la gráfica se definen las variables de entrada las cuales son: Error y VelMotor; y como salida la variable Voltaje.

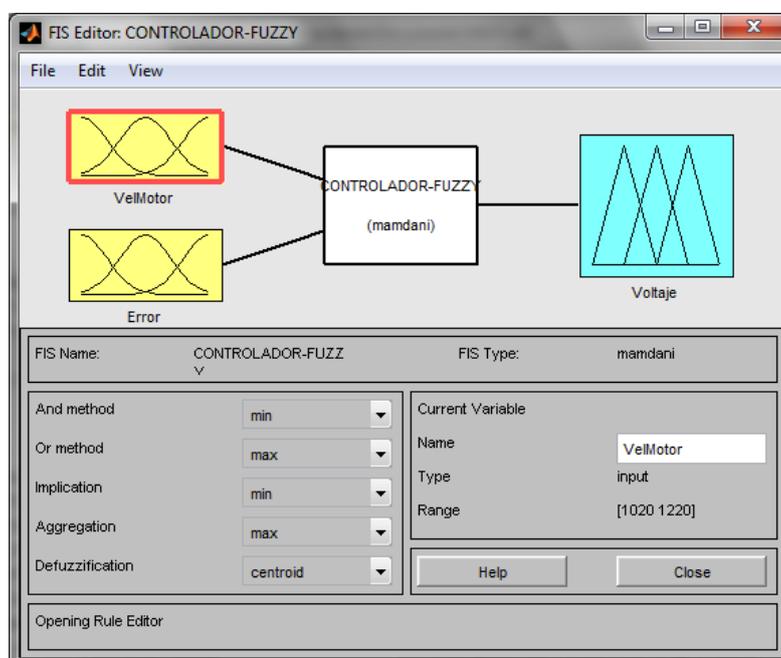


Figura 3.17 Interfaz para el ingreso de variables

A continuación se procede a declarar las funciones de membresía para cada una de las variables: VelMotor (figura 3.18), Error (figura 3.19) y Voltaje (figura 3.20).

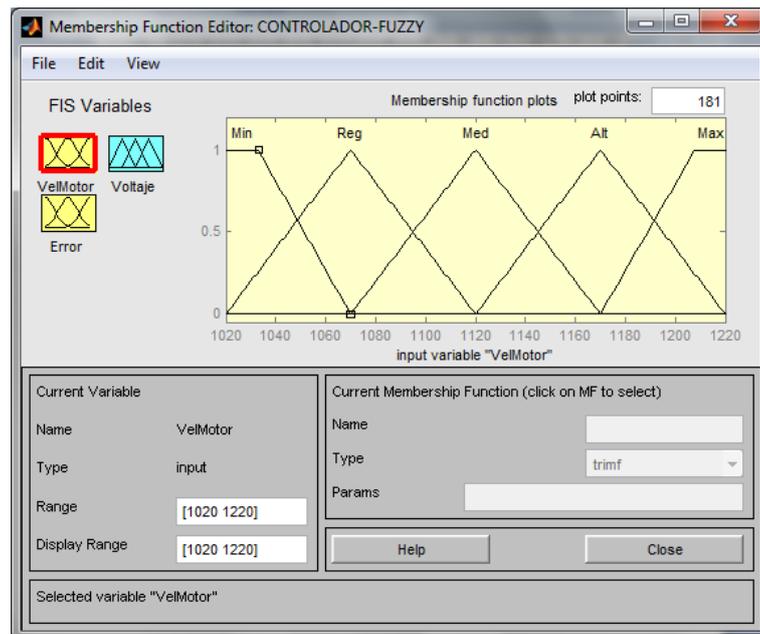


Figura 3.18 Funciones de membresía para la variable VelMotor

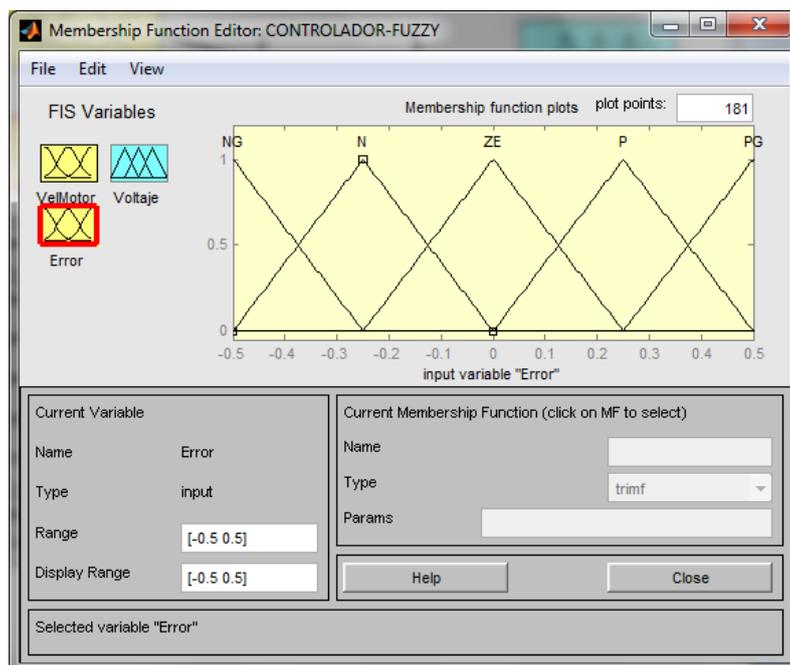


Figura 3.19 Funciones de membresía para la variable Error

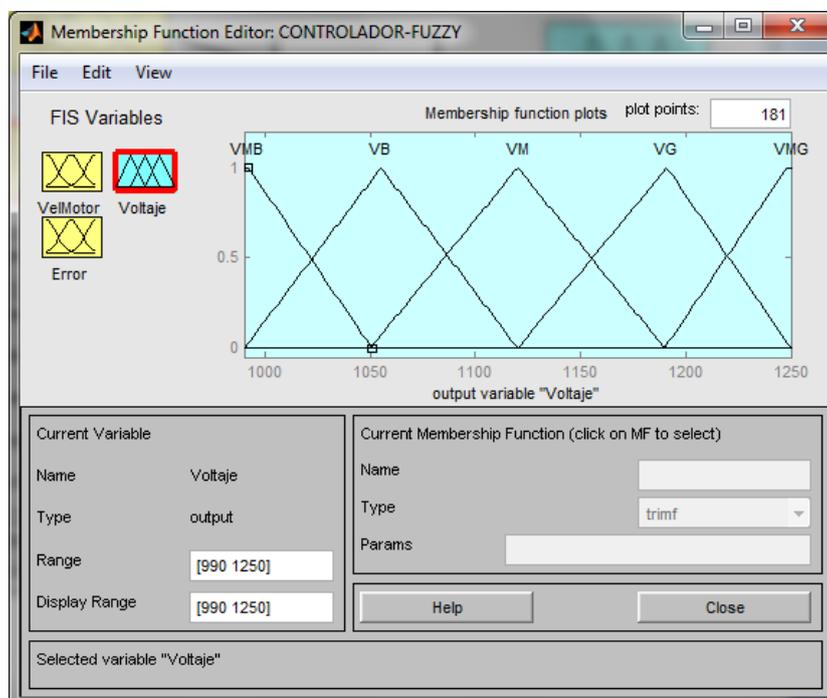


Figura 3.20 Funciones de membresía para la variable Voltaje.

Luego se procede a crear las reglas de inferencia basadas en el conocimiento del experto, como se muestra en la figura 3.21.

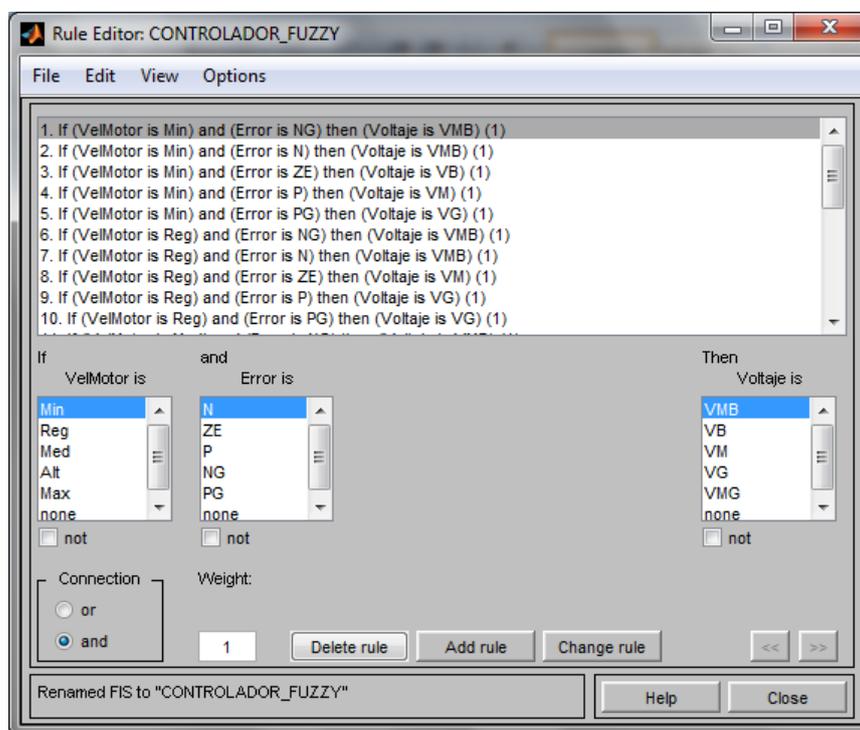


Figura 3.21 Editor de Reglas de Inferencia

Se procede a ejecutar la simulación con las reglas establecidas. En la Figura 3.22 se observa como se realizan las operaciones lógicas entre las entradas para generar la salida.

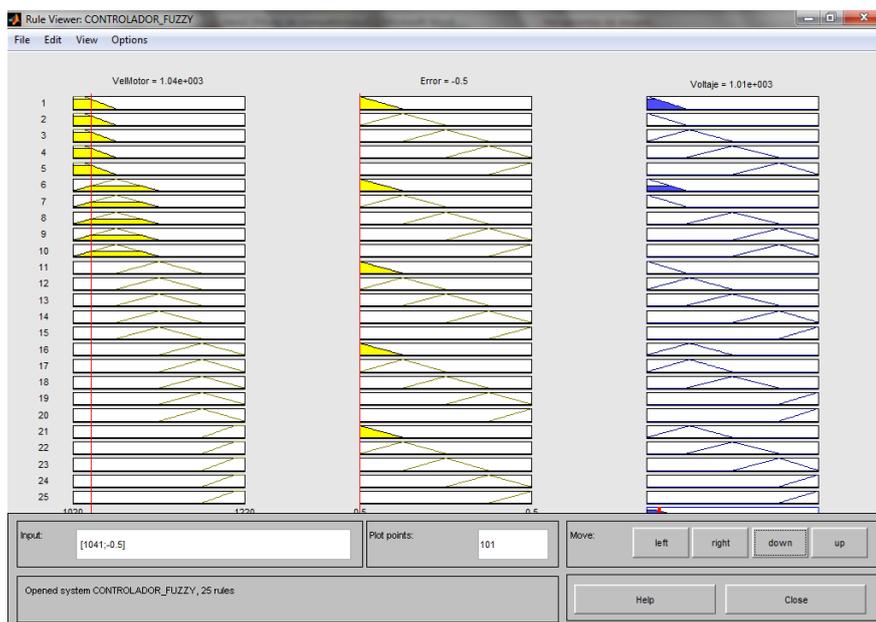


Figura 3.22 Visualizador de Reglas en ejecución del controlador FUZZY

Los sistemas difusos ofrecen un procedimiento sistemático para transformar un conjunto de reglas lingüísticas en un mapeo no lineal. En el caso de un controlador difuso, todo el sistema compuesto por fusificador, defusificador, base de reglas y motor de inferencia puede ser reemplazado por un mapeo no lineal de la superficie de control (Figura 3.23), la cual se extrae realizando el proceso de inferencia difusa sobre un barrido completo de los universos de discurso de entrada para obtener las salidas correspondientes entregadas por el defusificador.

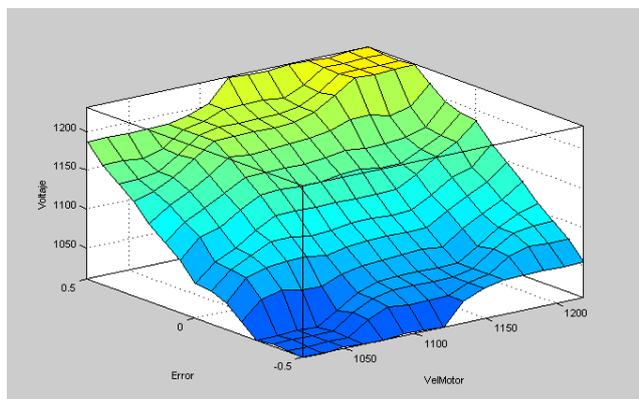


Figura 3.23 Superficie del controlador difuso.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo de este capítulo es evaluar el comportamiento del motor de inducción, utilizando un controlador clásico PID y un controlador lógico difuso CLF para realizar el control de velocidad.

4.1 Respuesta a la señal de entrada

En esta prueba evaluamos el comportamiento del sistema ante los cambios de referencia, tanto desde el arranque en que el motor no tiene carga como cuando alcanza la carga completa. Con este fin utilizamos una entrada escalón para evaluar la respuesta de cada controlador, en base al sobre-pico que experimenta el sistema en su arranque y su tiempo de estabilización.

En la figura 4.1 se puede observar el sobre-pico de arranque que experimenta el sistema trabajando con un controlador PID, su valor se establece en 1243 RPM.

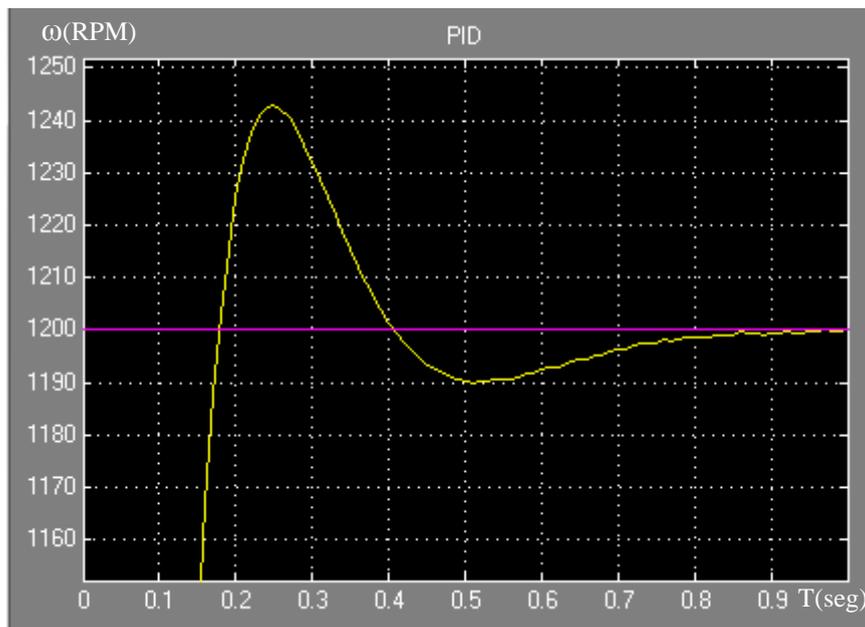


Figura 4.1 Sobre-pico de arranque con PID

En la figura 4.2 muestra el sobre-pico de arranque que experimenta el sistema trabajando con un controlador lógico difuso CLF, su valor se establece en 1229 RPM.

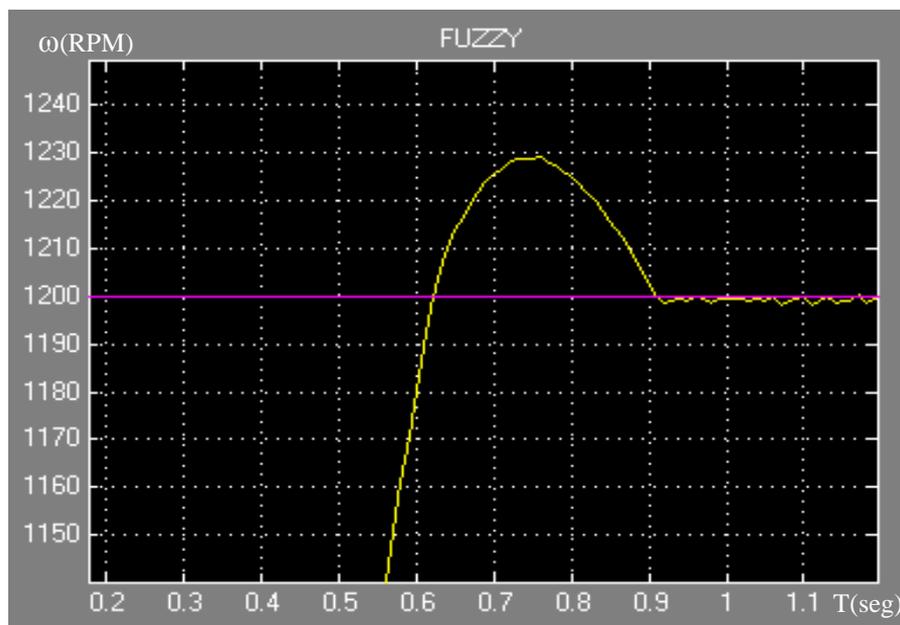


Figura 4.2 Sobre-pico de arranque FUZZY

El resultado de esta prueba indica una reducción del sobre pico que experimenta el sistema en 1.13%, cuando se reemplaza el controlador PID por el controlador difuso.

La figura 4.3 muestra el tiempo de estabilización de sistema empleando el controlador PID. Su valor es de 0.7 segundos.

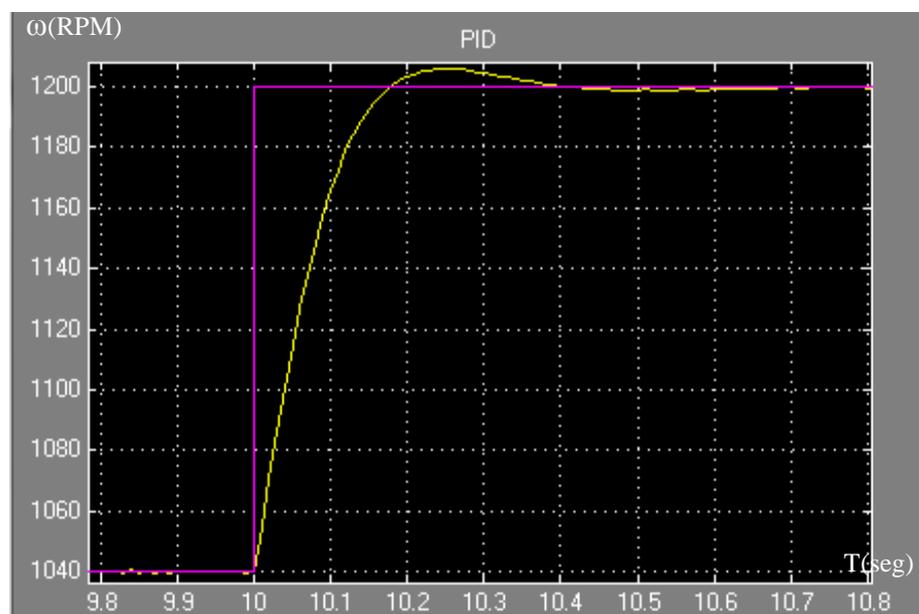


Figura 4.3 Tiempo de estabilización PID

La figura 4.4 muestra el tiempo de estabilización del sistema cuando se utiliza un controlador difuso, su valor es de 0.47 segundos.

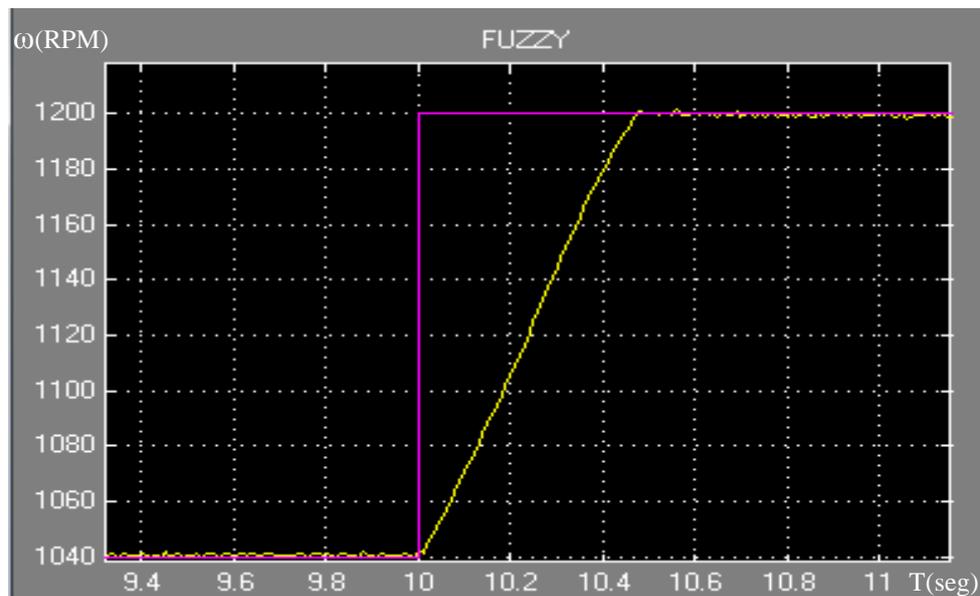


Figura 4.4 Tiempo de estabilización FUZZY

Otro detalle importante que muestra la figura 4.5, es que el sobre-pico del segundo ciclo que experimenta el sistema al utilizar un controlador PID desaparece con el controlador difuso, así como también se hace evidente la característica de linealidad introducida por el controlador difuso que se presenta como una salida más suave y sin transitorios bruscos; sin embargo es importante mencionar el efecto de fluctuación de la señal cuando alcanza la referencia, detalle que no se muestra con el controlador PID, aunque no influye en el desempeño del sistema.

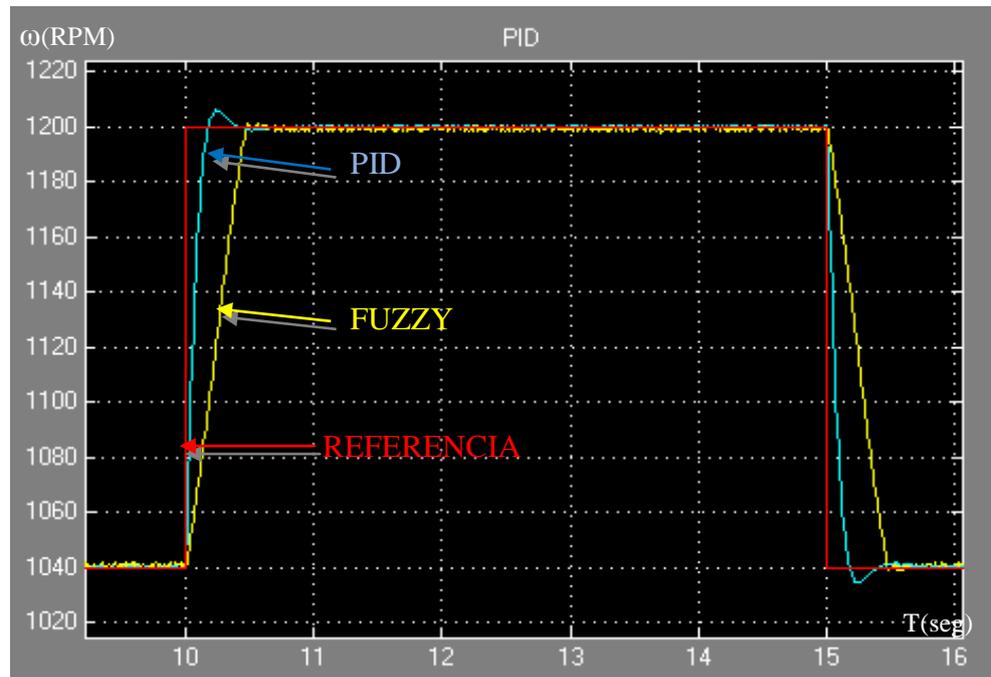


Figura 4.5 Comparación del sobre-pico en el segundo ciclo

4.2 Análisis de resultados

En base a los resultados presentados en este capítulo se deduce que nuevamente el controlador PID, se ve superado por el controlador difuso, puesto que el tiempo de estabilización del sistema cuando usa el controlador PID, se reduce en un 32.86% al utilizar un controlador difuso.

CONCLUSIONES

Uno de los principales problemas en los modelos de control clásico es la identificación del sistema en su forma más precisa posible. Esto se dificulta para sistemas para los que no se puede extraer su modelo matemático por lo complicado de los mismos. El control clásico o convencional no asimila bien el conocimiento parcial en los sistemas, por otro lado la lógica difusa está bien fundamentada matemáticamente, utilizando conocimientos parciales y que nos proporciona una herramienta poderosa al realizar aplicaciones de control.

1. En este caso donde el controlador FUZZY fue superior al controlador PID, el PID presenta comportamientos inestables en la salida, como se puede observar en las curvas de salida (Figura 4.5), mientras que el difuso presenta su salida más suave y sin cambios bruscos. Con lo cual se demostró para nuestro proyecto que el controlador FUZZY es más eficiente que el controlador PID.

2. La ayuda brindada por el experto en este campo fue una guía muy importante puesto que sin su ayuda no habríamos podido desarrollar el controlador difuso eficientemente.

3. Una de las ventajas del controlador difuso es su fácil diseño, puesto que la estrategia de controlar se desarrolla con el conocimiento del experto en esa área. Sin embargo cabe recalcar el pequeño inconveniente que presenta en la metodología de ajuste del controlador, ya que el ajuste se realiza mediante ensayo de prueba y error.

4. Puesto que no es sencillo o intuitivo introducir modificaciones al controlador de lógica difusa, este presenta desventaja comparativa con los controladores de control clásico.

RECOMENDACIONES

1. En este proyecto se trabajó con un motor relativamente sencillo de operar, por lo cual se usó 5 funciones de membresía para que funcione adecuadamente el controlador dentro del criterio de eficiencia que se propuso, pero si se desea trabajar con un sistema más sensible y que requiera de mayor precisión se recomienda agregar funciones de membresía.
2. Se tiene que tomar en cuenta que este proyecto al ser completamente simulado, usó escalas matemáticas directas entre la velocidad y el voltaje ya que en teoría no afecta su resultado por el mismo hecho de ser una simulación, pero si se desea implementar de manera real dicho sistema necesita de sensores que sirvan para convertir dichas escalas entre sí, de voltaje a velocidad y velocidad a voltaje para que trabaje y se acople adecuadamente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Henry Antonio Mendiburu Díaz, “Automatización Medioambiental”, Pearson Alhambra, 2005.
- [2] D. Guzmán, V.M. Castaño, “La lógica difusa en Ingeniería: Principios, aplicaciones y futuro”, Revista Ciencia y Tecnología, pp.87-107, 2006.
- [3] Bose, Kimal, “Modern Power Electronics and AC Drives”, Prentice Hall, 2002
- [4] Wang, Li-Xin, “Adaptive Fuzzy Systems and Control”, Prentice Hall, 1994.
- [5] Rashid, Muhammad, “Power Electronics Handbook”, Academic Press, 2001.
- [6] The Mathworks, Fuzzy Logic ToolBox- Help Manual. 2010
- [7] Kickert, W., Mamdani, E.H. *Analysis of fuzzy logic controller*. Fuzzy Sets and Systems. Vol1. 1978.
- [8] Takagi, T., Sugeno, M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1985; 15-1.
- [9] Y. Tsukamoto. An Approach to Fuzzy Reasoning Method. In Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, ed. M. Gupta, R. Ragade, R. Yager, North-Holland, Netherlands. 1979.

[10] Álvarez, I. Aportaciones al diseño e implementación de controladores difusos: Aplicación al curado del tabaco en hoja. Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, Universidad de Granada, 2006; 42.