

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**DISEÑO, PROGRAMACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE
CONTROLADORES EN PLCs PARA CONTROL DE SISTEMAS
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES DIFUSOS
BASADOS EN LOS MÉTODOS DE INFERENCIA DE MAMDANI Y
TAKAGI-SUGENO EN EL PLC MODICON M580 PARA CONTROL
DE VELOCIDAD DE UN MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

JONATHAN ARTURO CANDO GUALOTUÑA

jonathan.cando01@epn.edu.ec

DIRECTOR: LUIS ALBERTO MORALES ESCOBAR

luis.moralesec@epn.edu.ec

Octubre del 2022

CERTIFICACIONES

Yo, JONATHAN ARTURO CANDO GUALOTUÑA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



JONATHAN ARTURO CANDO GUALOTUÑA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JONATHAN CANDO ARTURO GUALOTUÑA bajo mi supervisión.



LUIS ALBERTO MORALES ESCOBAR
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JONATHAN ARTURO CANDO GUALOTUÑA

LUIS ALBERTO MORALES ESCOBAR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre que siempre está presente y con todo su amor me acompaña en mis objetivos, a mi enamorada por todo su apoyo y cariño.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi núcleo familiar por su comprensión y cariño en mi trayectoria de formación académica.

Agradezco a todas las personas con quien compartí gratos momentos fuera y dentro de la universidad.

Agradezco a las profesoras y a los profesores con los que aprendí y fueron una guía para mí formación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.3 ALCANCE	2
1.4 MARCOTEÓRICO.....	3
1.4.1 LÓGICA DIFUSA.....	3
1.4.2 HARDWARE.....	7
2 METODOLOGÍA.....	12
2.1 DISEÑO	12
2.1.1 DISEÑO DE CONTROLADORES DIFUSOS.....	12
2.1.2 IMPLEMENTACIÓN	20
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	34
3.1 RESULTADOS.....	34
3.1.1 CAMBIOS DE REFERENCIA ASCENDENTES Y DESCENDENTES.....	34
3.1.2 INGRESO DE PERTURBACIÓN A LA PLANTA.....	39
3.2 CONCLUSIONES.....	47
3.3 RECOMENDACIONES	48
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
5 ANEXOS.....	51
5.1 ANEXO I.....	51
5.2 ANEXO2.....	51
5.3 ANEXO 3.....	51
5.4 ANEXO 4.....	51

RESUMEN

Los métodos de control convencional basados en modelo han sido estudiados ampliamente y han presentado excelentes resultados al usar aproximaciones matemáticas basadas en principios físicos que representan el comportamiento del sistema bajo ciertas condiciones. Estos sistemas al ser implementados pueden someterse a perturbaciones, producidas por alguna fuerza externa o el ambiente, llegando a afectar el comportamiento de la planta y difiriendo del modelo obtenido lo cual podría degradar al controlador.

Los avances en el estudio de la lógica difusa permiten el desarrollo de controladores que no requieren de un modelo matemático del sistema detallado y pueden ser aplicados a procesos no lineales o plantas con un modelo matemático demasiado complejo. Para el desarrollo de estos controladores se requiere de la experiencia del diseñador transformada en un conjunto de variables lingüísticas que se procesan para obtener una variable numérica real resultante.

En base a lo antes dicho, en este trabajo se implementarán controladores difusos en el PLC M580, como alternativa para el control de velocidad de un motor trifásico de inducción. Mediante el lenguaje FBD, usando el software Unity Pro XL, se programará la lógica difusa del controlador tomando en consideración dos métodos de inferencia diferentes, estos son Mamdani y Takagi – Sugeno. El sistema en lazo cerrado está conformado por el PLC un sensor de velocidad, una etapa de acondicionamiento de señal y un variador de frecuencia conectado al motor. De la misma manera, se ha programado una interfaz de operador que permite observar el comportamiento de la planta en línea, así como cambios de referencia y perturbaciones.

PALABRAS CLAVE: Mamdani, Takagi-Sugeno, Controladores difusos, PLC, motor trifásico de inducción

ABSTRACT

Conventional model-based control methods have been extensively studied and have presented excellent results by using mathematical approximations based on physical principles that represent the behavior of the system under certain conditions. These systems, when implemented, can be subjected to disturbances, produced by some external force or the environment, affecting the behavior of the plant and differing from the model obtained, which could degrade the controller.

Advances in the study of fuzzy logic allow the development of controllers that do not require a detailed mathematical model of the system and can be applied to nonlinear processes or plants with a complex mathematical model. For the development of these controllers, the experience of the designer is required, transformed into a set of linguistic variables that are processed to obtain a resulting real numerical variable.

Based on the above, in this work fuzzy controllers will be implemented in the M580 PLC, as an alternative for speed control of a three-phase induction motor. Through the FBD language, using the Unity Pro XL software, the fuzzy logic of the controller will be programmed taking into consideration two different inference methods, these are Mamdani and Takagi - Sugeno. The closed loop system is made up of the PLC, a speed sensor, a signal conditioning stage and a frequency inverter connected to the motor. In the same way, an operator interface has been programmed that allows observing the behavior of the plant online, as well as reference changes and disturbances.

KEY WORDS: Mamdani, Takagi-Sugeno, Fuzzy controllers, PLC, three-phase induction motor

1 INTRODUCCIÓN

Los controladores difusos son una alternativa para sistemas no lineales, donde resulta muy complejo obtener la representación matemática. La cualidad del controlador difuso es que no requiere del modelo matemático de la planta, sino, del conocimiento del diseñador basado en el funcionamiento del sistema. Sin embargo, una de las falencias del controlador es su calibración porque se realiza de forma heurística basada en la experiencia del diseñador mediante la prueba y el error. El concepto básico de controladores difusos fue desarrollado en los años 60 por Zadeh [1], cuando definió la teoría de conjuntos difusos, sin embargo, no fue desarrollada a profundidad debido a que se requería una capacidad de cómputo alta, lo cual en la actualidad ya no es un problema. El estudio de la teoría difusa en los últimos años ha permitido el desarrollo de controladores difusos que se han adaptado adecuadamente a diferentes sistemas [2].

Los motores trifásicos de inducción son usados en muchos procesos industriales donde se controla la velocidad del eje del motor para accionar diferentes cargas como, por ejemplo, bandas transportadoras, mezcladoras, agitadores, etc. Estos sistemas requieren mantener la velocidad en la referencia especificada a pesar de que perturbaciones externas las afecten. En este trabajo se pretende implementar controladores difusos basados en los métodos de inferencia de Mamdani y Takagi-Sugeno para realizar el control de velocidad del motor trifásico de inducción como una alternativa de control. Los controladores difusos serán programados en el PLC Modicon M580. Para variar la velocidad del motor se usa un variador de frecuencia y para medir la velocidad del eje de giro del motor se usa un sensor, De esta forma se tiene un sistema de control difuso en lazo cerrado.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar controladores difusos basados en los métodos de inferencia de Mamdani y Takagi-Sugeno en el PLC Modicon M580 para control de velocidad de un motor trifásico de inducción.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre los controladores difusos basados en los métodos de inferencia de Mamdani y Takagi-Sugeno para su aplicación en el control de velocidad de un motor trifásico de inducción mediante el PLC Modicon M580.

2. Realizar una revisión bibliográfica del hardware necesario para el diseño de un módulo didáctico que permita realizar el control de velocidad de un motor trifásico de inducción mediante el PLC Modicon M580.
3. Programar los controladores difusos basados en los métodos de inferencia de Mamdani y Takagi-Sugeno y crear librerías en el PLC Modicon M580 para el control de velocidad de un motor trifásico de inducción.
4. Programar una Interfaz gráfica para controlar el sistema, observar las variables en línea y comprobar el comportamiento de los controladores en la pantalla de un computador.
5. Validar el desempeño los controladores difusos basados en los métodos de inferencia de Mamdani y Takagi-Sugeno frente a un controlador convencional usado para el control de velocidad de un motor de inducción trifásico.

1.3 ALCANCE

- Se realizará una revisión bibliográfica sobre los controladores difusos basados en los métodos de inferencia de Mamdani y Takagi-Sugeno y se aplicará en el control de velocidad de un motor trifásico de inducción mediante el PLC Modicon M580.
- Se realizará una revisión bibliográfica del hardware necesario y se implementará el módulo didáctico que permita realizar el control de velocidad de un motor trifásico de inducción mediante el PLC Modicon M580.
- Se programará los controladores difusos basados en los métodos de inferencia de Mamdani y Takagi-Sugeno y creará librerías en el PLC Modicon M580 para el control de velocidad de un motor trifásico de inducción.
- Se programará una Interfaz gráfica en la que se podrá cambiar parámetros del sistema, se observará las variables en línea y se comprobará el comportamiento de los controladores.
- Se validará el desempeño de los controladores difusos basados en los métodos de inferencia de Mamdani y Takagi-Sugeno frente a un controlador convencional usado para el control de velocidad de un motor de inducción trifásico

1.4 MARCOTEÓRICO

1.4.1 LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa es una técnica de inteligencia artificial que usa expresiones que no son verdaderas por completo o expresiones que no son completamente falsas [1]. El concepto de lógica difusa está asociado con la forma del razonamiento humano donde pueden existir ambigüedades [2] [3]. En 1972 E. Mamdani [3] usó la lógica difusa y el conocimiento del operario experto de una máquina de vapor para adecuar un controlador difuso, desde entonces se ha usado la lógica difusa para el control de diferentes plantas [1]. La aplicabilidad de la lógica difusa se debe a la característica de trabajar con datos no fiables o inexactos, de donde se puede obtener una estrategia de control [4].

La lógica difusa implementa conjuntos difusos que permiten formalizar la realidad donde no se tiene información precisa [3]. Los conjuntos difusos son una extensión de los conjuntos clásicos, donde un elemento puede pertenecer o no pertenecer a un conjunto, o pertenecer parcialmente a él. Cada conjunto difuso es asociado a funciones de pertenencia o funciones de membresía donde un elemento pertenece en cierto grado. De esta forma se modela la ambigüedad de las variables [1].

1.4.1.1 FUNCIONES DE MEMBRESÍA

Las funciones de membresía dentro de la lógica difusa sirven para cuantificar el grado de valor de pertenencia [2]. Cada conjunto representa un intervalo definido dentro de los números reales. En estas funciones bidimensionales, se conoce al eje vertical como el “universo de discurso” ya que define el rango de los valores que pueden ser cuantificados por conjuntos borrosos [3]. Es decir, es el rango de valores que puede asumir una entrada o una salida dentro del sistema difuso. El eje horizontal representa la certeza o el intervalo de valores de las variables lingüísticas[3]. De esta forma se puede especificar un valor lingüístico por medio de una función de pertenencia. Estas funciones de pertenencia cuantifican continuamente valores y pueden presentar diferentes formas como se muestra en la Figura 1.1.

1.4.1.1.1 Función de membresía Gaussiana

También llamada campana de Gauss tiene dos términos reales mayores a cero denominados b y c [5]. De estos dos términos depende la función simétrica, el término b representa el punto donde se encuentra la parte superior de la campana y el término c representa el ancho de la campana [1]. Se expresa mediante la Ecuación 1.1

$$\mu = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (1.1)$$

Esta función se define como μ , y realiza la cuantificación de la certeza o grado de verdad de $e(t)$ para llegar a ser clasificada dentro de la representación lingüística [3]. La Figura 1.1 representa la función gaussiana con centro en 0.

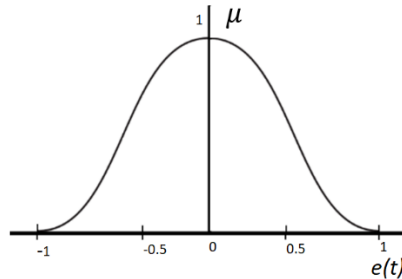


Figura 1.1 Función Gaussiana

1.4.1.1.2 Función Triangular

Esta función representa un triángulo, que puede facilitar los cálculos de superficies [6]. La función tiene un centro y los límites, en el eje $e(t)$, pueden ser distancias simétricas o diferentes, según la base de conocimiento y especificaciones de diseño [1].

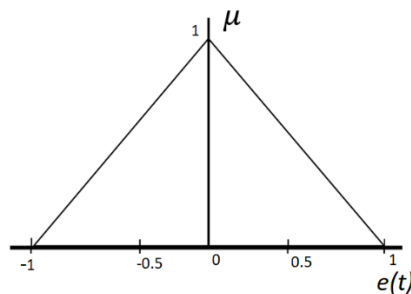


Figura 1.2 Función triangular

Como se observa en la Figura 1.2, la función triangular está compuesta de dos rectas, una ascendente y otra descendente respectivamente, intersecadas en un punto. La función triangular se obtiene por partes usando la Ecuación 1.2 correspondiente al cálculo de la pendiente, m .

$$m = \frac{u - u_0}{e - e_0} \quad (1.2)$$

1.4.1.2 CONTROLADORES DIFUSOS

El control difuso facilita una metodología para representar, implementar y manipular un sistema en base del conocimiento heurístico del operador. El controlador difuso requiere de 4 componentes importantes [7]. El primer componente es la “base de las reglas” que contiene el conjunto de todas las reglas que permiten controlar el sistema. El segundo componente es el mecanismo de inferencia, se encarga de evaluar las reglas de control

para definir una salida [5]. El tercer componente es la fuzzificación, permite modificar la información de entrada para que pueda ser interpretada y se puedan procesar los datos mediante la comparación con la base de las reglas [8]. El último componente del controlador es la defuzzificación que permite obtener un valor real de la conclusión en la salida obtenida por el mecanismo de inferencia [3].

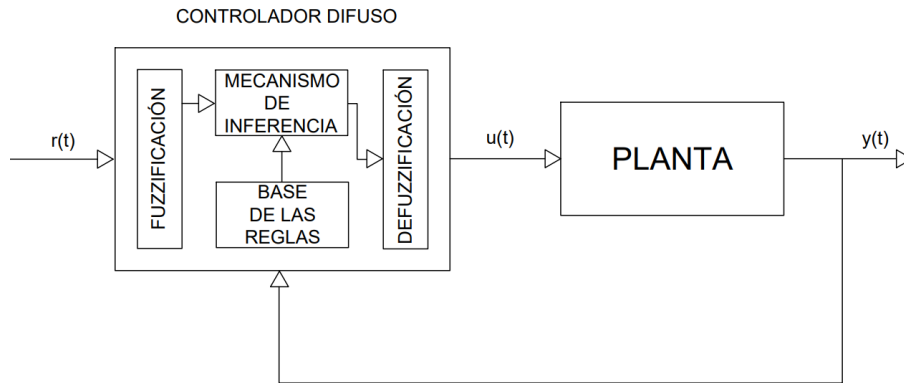


Figura 1.3 Arquitectura básica del controlador difuso

La Figura 1.3 describe la arquitectura básica de un controlador difuso. Según el esquema de control que se elija el controlador difuso tendrá diferentes comportamientos, siendo más rápido o con respuesta suave [9].

1.4.1.3 Sistema difuso Mamdani

El sistema difuso tipo Mamdani, fue el primer método difuso aplicado a sistemas de control [10]. Requiere de la fuzzificación y defuzzificación para el procesamiento de información [10]. En primer lugar, se lleva la variable lingüística a un valor numérico mediante el mecanismo de inferencia y conjuntos difusos. La defuzzificación permite obtener una variable real del conjunto difuso resultante [4]. El procesamiento de las entradas para obtener una salida del sistema difuso se basa en un conjunto de condiciones o reglas [11]. Esto puede ser descrito por la premisa y consecuente, “Si – entonces” [12]. En el sistema difuso las entradas están asociadas a la premisa “Si”, y la salida está asociada al consecuente, “Entonces” [5]. Considerando un sistema múltiples entradas y una salida, MISO [3] se tiene:

$$\text{Si } \tilde{u}_1 \text{ es } \tilde{A}_1^j \text{ y } \tilde{u}_2 \text{ es } \tilde{A}_2^k \text{ y } \dots \text{ y } \tilde{u}_n \text{ es } \tilde{A}_n^l \text{ Entonces } \tilde{y}_q \text{ es } \tilde{B}_q^p \quad (1.3)$$

En la Ecuación 1.3 se expresa \tilde{u}_1 como la primera entrada y \tilde{A}_1^j como la variable lingüística donde j representa la regla. En el conjunto de salida, \tilde{B}_q^p , p representa la variable lingüística

activada y q representa la variable de salida. Para un controlador de múltiples entradas y una sola salida (MISO) como el caso de estudio de este trabajo, se tiene que $q = 1$.

1.4.1.3.1 Centro de gravedad "COG"

El centro de gravedad del área es usado en el proceso de defuzzificación, como se describe en el Capítulo 2. Se obtiene un número real al calcular el centro de gravedad de la función resultante, para ello se emplea la Ecuación 1.4.

$$u^{real} = \frac{\sum_i b_i \int \mu_i}{\sum_i \int \mu_i} \quad (1.4)$$

En la Ecuación 1.4, la salida del controlador se define como el término u^{real} , donde μ_i corresponde a la función de pertenencia activada, que puede ser una función gaussiana o triangular, y el término b_i es el valor del centro de dicha función [3].

1.4.1.4 Sistema Difuso Takagi – Sugeno

El sistema de Takagi – Sugeno es parte de los llamados sistemas difusos funcionales. En este tipo de sistemas se usa, para este trabajo la función de tipo singleton [3]. La regla para un controlador de múltiples entradas y una salida se describe en la Ecuación 1.5.

$$Si \tilde{u}_1 \text{ es } \tilde{A}_1^j \text{ y } \tilde{u}_2 \text{ es } \tilde{A}_2^k \text{ y } \dots \text{ y } \tilde{u}_n \text{ es } \tilde{A}_n^l \text{ Entonces } b_i = g_i(\cdot) \quad (1.5)$$

Donde $g_i(\cdot)$ es una función polinómica de orden cero, el " \cdot " es el argumento de la función g_i , y usa la misma premisa de las reglas definidas para el sistema difuso estándar. Es decir, se usa un consecuente definido como $g_i(\cdot)$ en vez de un término lingüístico con una función de pertenencia asociada. En este trabajo corresponde a una constante ya que se ha considerado trabajar con una función de orden cero (función singleton). De esta forma el sistema funcional se generaliza y se puede usar el mínimo o el producto para representar la premisa [13], siendo semejante a un mapeo lineal definido [3].

1.4.1.5 CRITERIOS DE DESEMPEÑO

Los criterios de desempeño son usados para conocer el comportamiento del controlador en base al error. El Índice ISE se enfoca en los errores grandes que se producen cuando la planta responde inicialmente o en el estado transitorio, sin embargo tiene menor valoración los errores pequeños [14]. Este criterio se expresa en la Ecuación 1.6.

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (1.6)$$

El índice IAE (Ecuación 1.7) es usado ante entradas tipo escalón, obteniendo el valor absoluto del error, sin embargo no es optimizado para sistemas amortiguados [14].

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1.7)$$

Por medio de la experimentación se pueden obtener los índices ISE e IAE y determinar el rendimiento en la sintonización de la planta, para mejorarla [15]. Esto ayuda a la determinación de los parámetros del controlador mediante la minimización de los valores de estos índices [16].

1.4.2 HARDWARE

1.4.2.1 PLC MODELO MODICON M580

El Modicon M580 Ethernet PAC o su abreviación, M580 ePAC, es un controlador programable con red troncal de Ethernet. Esta característica del PLC permite realizar el control mediante una red SCADA, DCS, etc. Es decir, se pueden implementar entradas remotas con flexibilidad además de permitir integrar cualquier dispositivo habilitado para Ethernet [17]. Los componentes que lo constituyen son:

1.4.2.1.1 Fuente de alimentación BMX CPS 3500

El módulo es la fuente de alimentación del PLC que garantiza suministrar la energía adecuada para el buen funcionamiento del PLC M580 [18]. Esta fuente de alimentación tiene una entrada monofásica de 110 [VAC].

1.4.2.1.2 Procesador BME P58 1020

Es el módulo que contiene el procesador del PLC, soporta hasta con 1024 entradas – salidas digitales y hasta 256 entradas y salidas análogas. Cuenta con comunicación Ethernet, TCP/IP. Para el procesamiento de información cuenta con una ram de 4 [MB] y 384 Kb para el programa y datos [18].

1.4.2.1.3 Módulo de entradas digitales – BMX DAI 1604

Este módulo cuenta con 16 entradas digitales que soporta hasta 120 [V] ac con una frecuencia de 60 Hz [18].

1.4.2.1.4 Módulo de salidas Digitales – BMX DRA 1605


Es un módulo de 16 salidas digitales tipo relé de corriente continua y alterna. Cuenta con un borne común para 8 canales. Los terminales están determinados para 24 [V] dc o de 24 a 240 [V] ac [18].

1.4.2.1.5 Módulo I/O Analógicas – BMX AMM 0600

Este módulo añade al PLC entradas y salidas analógicas. Dispone de 4 entradas de voltaje y corriente, 2 salidas de voltaje y corriente que pueden manejar los valores de 0V-10V, 0V-5V, 1V-5V, 4-20mA [18].

Las características generales del PLC M580 ePAC, con la configuración de hardware disponible se describe en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 PLC M580 [18]

PLC (ePAC) M580	Características	
	Marca	Schneider
	Alimentación	110 V
	Entradas digitales	16
	Entradas analógicas	4
	Salidas digitales	16
	Salidas analógicas	2

1.4.2.2 VARIDOR DE FRECUENCIA MODELO VFD 007 L 21 A

Se seleccionó el variador de frecuencia de marca Delta que permite variar la frecuencia de 0 a 60 [Hz] u otro valor definido por el usuario hasta un máximo de 400 [Hz]. El dispositivo cuenta con parámetros para definir el tiempo de la rampa de aceleración y desaceleración. El variador de frecuencia de 0.75 [KW] es adecuado para aplicaciones con motores de baja potencia [19]. Tiene un puerto para el control de la velocidad del motor por medio de la entrada analógica de voltaje en el rango de 0 a 10 [V]. En la Tabla 1.2 se puede observar el variador de frecuencia y sus características más relevantes.


Tabla 1.2 Variador de frecuencia [19]

Variador de frecuencia AD800-2S-0.75G	Características	
	Marca	KEWO
	Potencia	0,75 KW
	Alimentación	Monofásica 220V
	F.max	4000 Hz
	Entrada analógica	0 - 10 V
	Protección	Sobre voltaje, sobre corriente, cortocircuito, autodiagnóstico

1.4.2.3 MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN MODELO NV71B4

El motor trifásico es un equipo electromecánico que transforma la energía eléctrica en energía cinética rotativa o energía mecánica. La parte fija del motor se conoce como estator, está formada por una carcasa sólida con chapas metálicas. La parte móvil del motor es el rotor, está formado por un núcleo magnético ranurado, este eje se acopla a la carga mecánica. El motor asincrónico trifásico tiene la característica de que la velocidad del campo estatórico no será igual a la velocidad mecánica de giro del rotor [20]. Este tipo de motores son los más empleados en la industria por sus características de funcionamiento. En la Tabla 1.3 se observa el motor y algunas de sus características técnicas más relevantes.

Tabla 1.3 Motor trifásico de inducción

Motor trifásico de inducción	Características	
NV71B4	Marca	Delcrosa
	Velocidad Nominal	1670 RPM
	Frecuencia	60 Hz
	Potencia	0,6 HP
	Voltaje	220 V
	Corriente	2,3 A
	Norma	IEC

1.4.2.4 ENCODER INCREMENTAL MODELO E30S4-500-3-T-24

Para realizar la medición de velocidad de un motor trifásico de inducción existen diferentes opciones que permiten obtener la señal correspondiente a la velocidad del rotor. El encoder incremental es un transductor rotativo que realiza la transformación del movimiento angular del eje del motor en series de impulsos digitales. El principio de funcionamiento se muestra en la Figura 1.4a y se basa en la aplicación de un foto emisor, un foto receptor y el disco perforado con rendijas por donde pasa la luz emitida por el foto emisor [21].

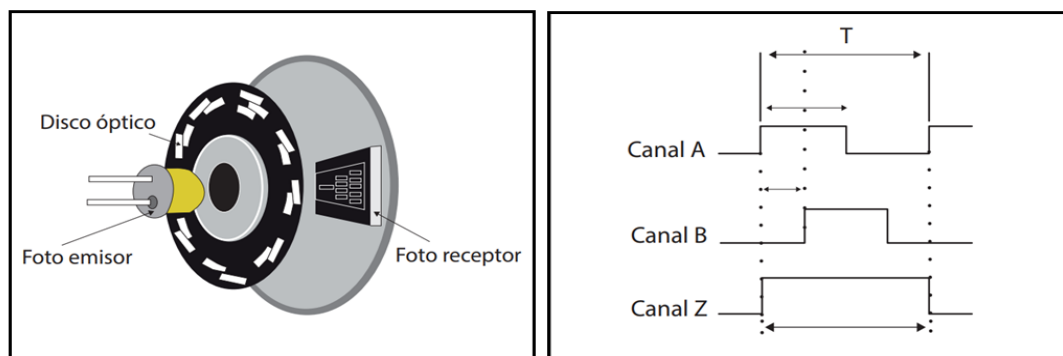



Figura 1.4 Encoder Incremental a) Componentes, b) Señal entregada

El receptor (Figura 1.4a) detecta las variaciones de luz que suceden al momento que el disco rota y lo transforma en variaciones eléctricas b. Para la salida del sensor se procesa la señal eléctrica obtenida para generar pulsos eléctricos sin interferencias. El encoder incremental tiene dos señales de ondas cuadradas denominadas Canal A y Canal B están desfasadas 90 grados eléctricos como se observa en la Figura 1.4 b). Si se usa únicamente el canal A o el canal B se puede determinar la velocidad a la que se encuentra el motor. Al usar los dos canales se puede determinar la velocidad y el sentido de giro del eje del motor. La tercera señal con la que cuenta el encoder incremental es el canal Z que proporciona la referencia de la posición cero del eje del disco del sensor [21].

Se ha seleccionado el encoder incremental rotativo de marca Autonic de la serie E30S, modelo E30S4-500-3-T-24 que se puede observar en la Tabla 1.4. La alimentación del sensor es de 24 Vdc y cuenta con tres salidas, canal A, canal B y canal Z. La resolución es de 500 pulsos por revolución, (P/R), con una máxima frecuencia de salida de 300 [KHz]. Para la protección de dispositivo cuenta con IP50(IEC) [22].

Tabla 1.4 Sensor de Velocidad [22]

Sensor de velocidad	Características	
		Marca
	P/R	500
	Alimentación	24 Vdc
	Tipo de salida	Totem Pole
	Salidas	A, B Y Z
	Tiempo de respuesta	1 us
	Máxima frecuencia	300 KHz
	Diámetro Eje	3 mm
	Protección	IP50

1.4.2.5 MODULO DE PERTURBACIÓN MECÁNICA: ENTENALLA

La entenalla es una herramienta usada para fijar o sostener piezas mediante la presión producida por el conjunto mecánico. Tiene una base, una mordaza fija y una mordaza móvil que se abre o se cierra según la dirección en la que se gire la manivela de la guía de la entenalla. La presión que puede generar depende de la estructura metálica y del tamaño. La estructura metálica del mecanismo de la entenalla se muestra en la Figura 1.5.




Figura 1.5 Entenalla compacta

1.4.2.6 ACONDICIONADOR DE SEÑAL DEL ENCODER (ARDUINO NANO)

El Arduino Nano es una placa de desarrollo compacta que incluye el microcontrolador ATmega328p con una memoria flash de 32 KB y un cristal de 16 [MHz]. Para la conectividad dispone de un puerto USB [23]. Esta placa cuenta con puertos para entradas y salidas analógicas de una amplitud máxima de 5 [V]. La programación de la placa se realiza mediante el software Arduino IDE. En la Tabla 1.5 se describe las principales características de la placa.

Tabla 1.5 Acondicionador [23].

Acondicionador	Características	
Arduino Nano	Marca	Arduino
	Alimentación	5 Vdc
	E/S digitales	14
	E/S Analógicas	6
	Conexión	Mini-USB, ICSP
	Microcontrolador	ATmega 164P
	Cristal	16 MHz

2 METODOLOGÍA

2.1 DISEÑO

2.1.1 DISEÑO DE CONTROLADORES DIFUSOS

El controlador difuso, emula el comportamiento que tendría el operario experto, por esta razón es que el diseño del controlador se debe realizar en base a la experticia que se tiene respecto a la planta. Este conocimiento o experiencia es representado por reglas asociadas a funciones de membresía para el error, derivada del error y la salida del controlador.

2.1.1.1 BASE DE CONOCIMIENTO

La señal de referencia $r(t)$ en [RPM], será definida (ingresada por el operador) en el HMI programado. Para obtener la información de la señal de salida, $y(t)$, de la planta: “variador – motor”, en [RPM] se usa el sensor de velocidad correspondiente al encoder detallado en el punto 1.4.2.4. El sensor mide la velocidad real a la que se encuentra el eje del motor trifásico de inducción de manera instantánea. Esta señal debe ser interpretada por el PLC para obtener la información adecuada y obtener la señal de salida correspondiente del controlador. El PLC cuenta con entradas y salidas analógicas de voltaje, por lo tanto, la señal resultante del controlador que será aplicado a la planta es de voltaje en un rango de 0 a 10V.

La planta “variador – motor” será controlada por medio de una señal de voltaje generada por el PLC. El variador de frecuencia cuenta con una entrada analógica de voltaje de 0 a 10V que ha sido programada para obtener un rango de frecuencia aplicada al motor entre 0 a 60Hz con lo que se alcanza la velocidad nominal.

La señal de frecuencia salida del encoder debe ser leída por un módulo especializado del PLC que permita el conteo rápido, ya que según la velocidad a la que se encuentre el motor se tendrá una variación de frecuencia. El bastidor del PLC M580, con el que se trabajará, no cuenta con un módulo de conteo rápido por lo que ha sido necesario acondicionar la señal del sensor para obtener una señal de voltaje continuo que pueda ser leída por una de las entradas analógicas del PLC. El detalle del diseño del acondicionador se muestra en la sección 2.1.2.1.

2.1.1.2 DEFINICIÓN DE REGLAS

La correcta definición de las variables lingüísticas requiere de la comprensión de la dinámica del proceso. Esto hace que el controlador del sistema difuso tome decisiones correctas en todo momento. Con el conocimiento que se tiene de la planta se puede obtener un buen controlador difuso en base a las diferentes combinaciones de los valores lingüísticos. Para

esto se ha definido 5 variables lingüísticas especificadas dentro del rango del universo del discurso [3]. Estas variables son: “Positivo alto: PA”, “Positivo bajo: PB”, “Cero: C”, “Negativo bajo: NB” y “Negativo alto: NA”.

Las entradas y la salida que tendrá el controlador se establecen en base al conocimiento del diseñador, su experiencia respecto del funcionamiento del sistema y las reglas difusas. La velocidad del motor en [RPM] es la variable a controlar del sistema. Para esto se ha especificado las entradas del controlador, que son las variables en las que se basarán las decisiones del controlador. La primera corresponde al error, $e(t)$, que se obtiene de la diferencia entre la señal de referencia $r(t)$ y la señal de salida de la planta $y(t)$ como se observa en la Ecuación 2.1. La segunda entrada del controlador es la derivada del error que indica la tasa de cambio de la variable, es decir, indica que tan rápido aumenta o disminuye la variable, como lo describe la Ecuación 2.2. Como es conocido, si la derivada del error es positiva, indica que la función es creciente y si es negativo indica que la función es decreciente. La salida del controlador, μ^{real} corresponde a un número real dentro del universo del discurso [3].

$$u_1 = e(t) = r(t) - y(t) \quad (2.1)$$

$$u_2 = \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.2)$$

Mediante las variables lingüísticas, las entradas y la salida del controlador descritas en las Ecuaciones 2.1, y 2.2 se diseña la base de las reglas. Para esta planta se definió cinco variables lingüísticas para cada una de las entradas y para la salida. El número de combinaciones de las premisas se calcula mediante la Ecuación [3].

$$(\#valores\ linguisticos)^2 \quad (2.4)$$

Para establecer las posibles combinaciones de reglas de acción se analizará la salida de la planta y la referencia de velocidad. Si la salida de la planta es mucho mayor a la referencia, como se muestra en la figura 2.1a) y en base a la Ecuación 2.1, se obtiene un error negativo, $-e(t)$. La afirmación de que el error es “Negativo Alto”, e_{NA} , representa que la velocidad del motor es mucho mayor a la velocidad de referencia. Si la tasa de cambio del error es “Positivo Alto”, “ de_{PA} ” significa que se requiere una acción correspondiente a “Positivo Alto”, u_{PA} , para que la salida de la planta pueda llegar a la referencia.

$$Si\ e(t)\ es\ "Negativo\ Alto"\ y\ \frac{d}{dt} e(t)\ es\ "Negativo\ Alto"\ Entonces\ \mu\ es\ "Positivo\ Alto" \quad (2.5)$$

Si la salida de la planta es muy cercana a la referencia y se tiene un error con tendencia a cero, correspondiente "e_C", Y si tampoco existe ningún cambio brusco del error, "de_C" quiere decir que la acción correspondiente es "u_C", es decir el valor de la salida debe mantenerse sin cambios en lo que respecta al valor lingüístico Cero.

$$\text{Si } e(t) \text{ es "Cero" y } \frac{d}{dt}e(t) \text{ es "Cero" Entonces } \mu \text{ es "Cero"} \quad (2.6)$$

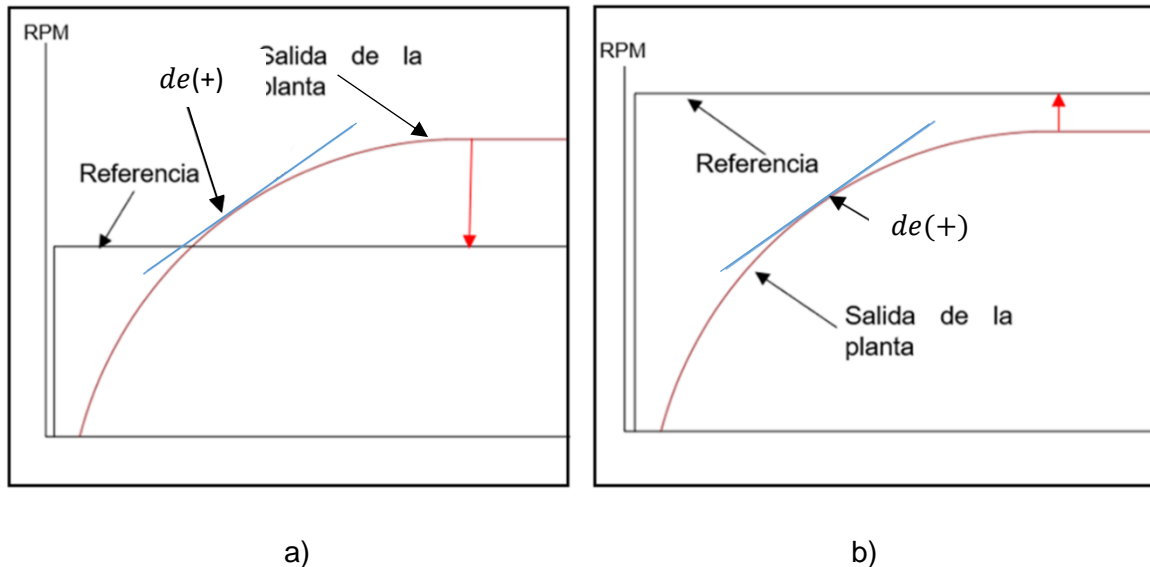


Figura 2.1 a) Salida de la planta mayor a la referencia de velocidad, b) Salida de la planta menor a la referencia de velocidad

En la Figura 2.1b se observa que la salida de la planta es menor la referencia, usando la Ecuación 2.1 se puede determinar que se produce un error positivo. Si el error es "Positivo Bajo", e_PB, y el cambio del error es "Positivo Alto", de_PA, es decir la tasa de cambio es rápida. Esto quiere decir que la acción que se requiere es "Negativo Alto" contrarrestar la inercia que tiene la planta y el error tienda a cero.

$$\text{Si } e(t) \text{ es "Positivo Bajo" y } \frac{d}{dt}e(t) \text{ es "Positivo Alto" Entonces } \mu \text{ es "Negativo Alto"} \quad (2.7)$$

De esta forma se pueden obtener las reglas del controlador, en base al conocimiento del funcionamiento del sistema. En la Tabla 2.1 se observa los valores lingüísticos para la entrada de error $e(t)$, y para la entrada de la derivada de error, $\frac{d}{dt}$. Se obtiene un total de 25 reglas de acción para los 5 valores lingüísticos del sistema difuso, como se describe en la Ecuación 2.4. Se muestran las posibles combinaciones que serán la conclusión resultante u .

Tabla 2.1 Reglas para determinar la acción de control

Conclusión "u"		CAMBIO DEL ERROR $\frac{d}{dt}e(t)$				
		de_PA	de_PB	de_C	de_NB	de_NA
ERROR $e(t)$	e_NA	uC	uPB	uPB	uPM	uPA
	e_NB	uNB	uC	uPB	uPB	uPA
	e_C	uNB	uNB	uC	uPB	uPB
	e_PB	uNA	uNB	uNB	uC	uPB
	e_PA	uNA	uNA	uNB	uNB	uC

2.1.1.3 FUNCIONES DE MEMEBRESIA DEL CONTROLADOR

Para la selección del tipo de función de membresía se prefiere la función que tenga área finita, ya que en el proceso del sistema difuso las áreas de las funciones pueden ser cortadas. El número de variables lingüísticas totales debe responder a todas las posibles situaciones de control. Además, según el tipo función de membresía se tiene un algoritmo más o menos complejo a desarrollar en el cálculo del proceso de fuzzificación o defuzzificación del sistema difuso [1].

2.1.1.3.1 Funciones de membresía para las entradas del controlador

Para la entrada del error, $e(t)$, del controlador se ha seleccionado la función gaussiana como función de membresía por sus características y simetría [3]. El universo del discurso se define para el error está en el rango de -1 a 1. Se considera el máximo valor real negativo del error que puede interpretar el controlador igual -1. El máximo valor real positivo del error es igual a 1 de tal forma que al tener un error nulo de cero exista la misma proporción tanto para el máximo como para el mínimo valor del error. El máximo valor real que puede alcanzar la función gaussiana, definida como μ , es igual a 1 y el mínimo valor es 0. Se especifica el ancho de la campana, correspondiente a la variable c de la Ecuación 1.1, de cada una de las funciones gaussianas igual a 0.15 para garantizar la activación de dos funciones como máximo (satisfaciendo la tabla de reglas) para facilitar los cálculos. El término b, de la Ecuación 1.1 corresponde al punto máximo de la función gaussiana, μ , de cada variable lingüística. Como se puede observar en la Figura 2.1 las funciones de membresía para negativo alto, eNA, y positivo alto, ePA, corresponden solo a la mitad de la función gaussiana, a diferencia de las otras funciones de membresía, porque el universo de discurso tiene sus límites en -1 y 1.

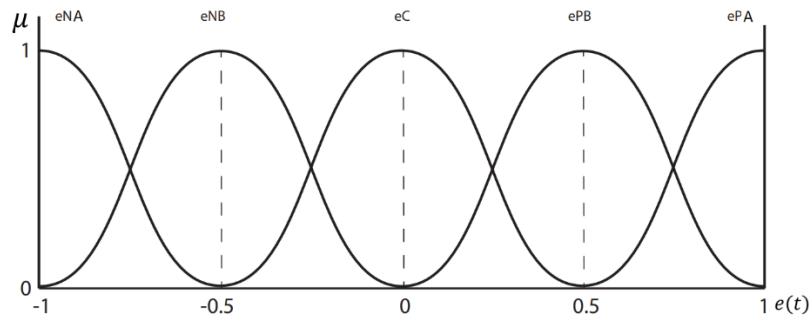


Figura 2.1 Función de pertenencia gaussiana para el error

Se selecciona la función de membresía gaussiana para cada valor lingüístico de la segunda entrada derivada del error, $\frac{d}{dt}e(t)$, como se observa en la Figura 2.2. Se determina los valores b y c de la Ecuación 1.1 para cada una de las funciones de membresía en los mismos valores fijados para el error.

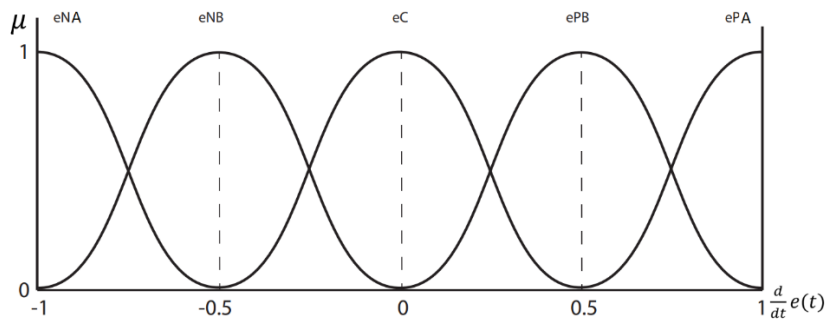


Figura 2.2 Función de pertenencia para la derivada del error

2.1.1.3.2 Función de membresía para la salida el controlador Mamdani

Para la salida del controlador se selecciona la función de membresía triangular como se muestra en la Figura 2.3. Se determina la mitad de la función para las funciones de membresía de las variables lingüísticas Negativo Alto, u_{NA} , y Positivo Alto, u_{PA} . Esta función tiene características que sirven para facilitar el desarrollo del algoritmo para el proceso de defuzzificación [3] que se detalla a continuación.

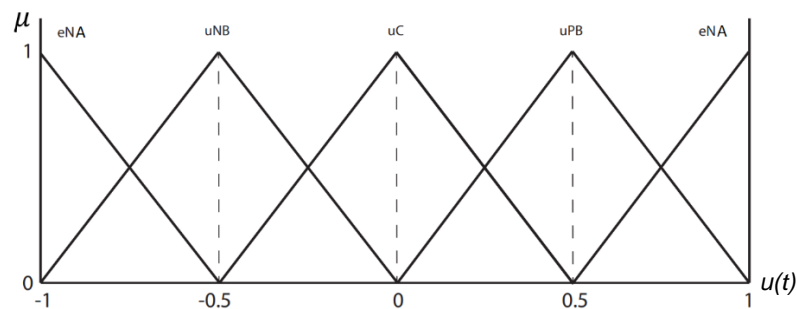


Figura 2.3 Función de pertenencia triangular para salida del controlador

En la Figura 2.3 se observa las funciones de membresía correspondientes a las variables lingüísticas en las que todas las bases son de dimensión igual a 1.

2.1.1.4 MECANISMO DE INFERENCIA

Dentro del sistema difuso el mecanismo de inferencia cumple dos funciones. La primera función es determinar la relevancia de cada regla en la situación actual en la que se encuentra el sistema según las entradas del controlador que son el error $e(t)$ y la derivada del error $de(t)$. Estas entradas se definen como u_i donde $i = 1, 2, \dots, n$. De esta forma u_1 corresponde a la entrada del error mientras que u_2 corresponde a la entrada de la derivada del error [24]

La segunda función del mecanismo de inferencia es obtener una conclusión usando la base de las reglas, descritas en el apartado 2.1.1.2, y las entradas u_i que este caso para el controlador es u_1 y u_2 . Para un sistema borroso de múltiples entradas y una sola salida, MISO, se muestra como cuantificar los elementos lingüísticos para el sistema Mamdani en la Ecuación 1.3 y para el sistema Takagi – Sugeno en la Ecuación 1.5.

A continuación, se realiza la combinación de las entradas, $e(t)$ y $\frac{d}{dt}e(t)$ con las premisas de las reglas, y luego se determina la coincidencia o aplicabilidad de cada regla [3]. Las reglas que se consideran activadas son aquellas en las que al evaluar la entrada tienen un resultado mayor a cero como muestra la Ecuación 2.11.

$$\mu\left(e(t), \frac{d}{dt}e(t)\right) > 0 \quad (2.11)$$

2.1.1.5 DEFUZZIFICACIÓN

2.1.1.5.1 Controlador Mamdani

Para realizar la defuzzificación, el procedimiento es normalmente por el centro de gravedad como se muestra en la Ecuación 1.4 del capítulo anterior. Se usa la función de membresía triangular simétrica, que alcanza un punto máximo igual a uno, para obtener el valor real resultante, definido como u^{real} , mediante la función simplificada para la defuzzificación, como se muestra en la Ecuación 2.12.

$$u^{real} = \frac{\sum_i b_i \int \mu_i}{\sum_i \int \mu_i} \quad (2.12)$$

Donde:

$$\int \mu_i = w_i \left(h_i - \frac{h_i^2}{2} \right) \quad (2.13)$$

En la Ecuación 2.13, w_i corresponde al ancho de la base de la función de salida triangular en este caso igual a 1, y h_i es la altura del punto máximo de la función de membresía correspondiente a cada variable lingüística activada obtenido como $h_i = \min(\mu_1(\tilde{u}_1), \mu_2(\tilde{u}_2), \dots, \mu_2(\tilde{u}_2))$ [3]. De esta forma se puede simplificar el algoritmo para la defuzzificación [3].

2.1.1.5.2 Controlador Takagi – Sugeno (T-S)

El polinomio $g_i(\cdot)$ para el sistema difuso de Takagi – Sugeno se describe en la Ecuación 2.14, donde $a_{i,j}$ son números reales.

$$b_i = g_i(\cdot) = a_{i,0} + a_{i,1}u_1 + \dots + a_{i,n}u_n \quad (2.14)$$

Debido a que se trabaja con una función T-S de primer orden, se considera solo el termino $a_{i,0}$, por lo que la salida del controlador se define como se expresa en la Ecuación 2.15:

$$u^{real} = \frac{\sum_i b_i h_i}{\sum_i h_i} = \frac{\sum_i a_{i,0} h_i}{\sum_i h_i} \quad (2.15)$$

Como se observa en la Ecuación 1.6, el sistema Takagi – Sugeno realiza una interpolación entre mapeos lineales [3]. Este sistema difuso funcional es equivalente a un sistema difuso que usa funciones de pertenencia tipo “singleton” a la salida [3].

2.1.1.6 SISTEMA DE CONTROL DIFUSO

Cuando ya se ha definido las entradas y salida del controlador se puede especificar el sistema de control difuso que puede ser, en este caso, Mamdani o Takagi – Sugeno [25]. Para esto se define el esquema de control a implementar, el cual es mostrado en la Figura 2.4. Como se ha indicado anteriormente se ha establecido 5 estados a la salida del controlador. Para el controlador Mamdani se ha establecido los centros: PA=1, PB=0.5, C=0, NB=-0.5 NA=-1. Para el controlador T-S se considera 5 funciones singleton con los mismos valores que han sido establecidos para el controlador Mamdani.

El estudio y desarrollo de los controladores difusos han demostrado que un controlador difuso tipo PI actúa bien eliminando el error en estado estable [26] [27], a diferencia de un controlador difuso tipo PD. Sin embargo, en un controlador tipo PI, la parte proporcional hace que tenga un bajo rendimiento en la respuesta transitoria debido al proceso integrador [28]. El controlador difuso tipo PID requeriría de tres entradas [29]. Esto implica que la superficie producida, que está en función de la base de las reglas, tendrá tres dimensiones, dificultando el diseño de la base de las reglas para el controlador [24].

Por lo tanto, se ha aplicado un esquema de control difuso basado en el control convencional tipo PID [30]. Este tipo de control es adecuado para sistemas con tiempo muerto, el cual disminuye el rendimiento del controlador [9].

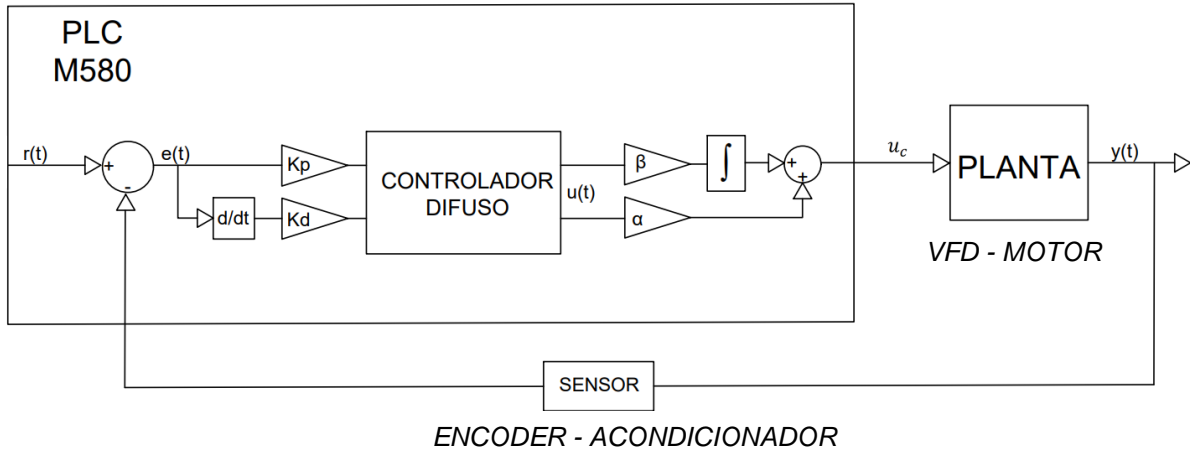


Figura 2.4 Esquema de control controlador difuso tipo PID

Para tener las características de un controlador difuso tipo PID se selecciona la estructura del control que representa dos controladores tipo PD y PI en paralelo [24] como se muestra en la Figura 2.4. De esta forma el controlador solo tiene dos entradas, el error y la tasa de cambio del error. La salida del controlador, $u(t)$, representa el valor correspondiente de u^{real} en función del tiempo, se multiplica por la ganancia β para ser integrada y luego añadida al valor de la salida multiplicado por la ganancia α [24]. La salida del controlador se determina de por medio de la Ecuación 2.16:

$$u_c = \alpha u + \beta \int u dt \quad (2.16)$$

$$u_c = \alpha(eK_p + \dot{e}K_d) + \beta \int (eK_p + \dot{e}K_d) dt \quad (2.17)$$

$$u_c = \alpha eK_p + \alpha \dot{e}K_d + \beta K_p \int e dt + \beta K_d \dot{e} \quad (2.18)$$

$$u_c = e(\alpha K_p + \beta K_d) + \beta K_p \int e dt + \alpha K_d \dot{e} \quad (2.19)$$

El equivalente proporcional del controlador se describe por medio de la Ecuación 2.20.

$$\alpha K_p + \beta K_d \quad (2.20)$$

El equivalente integral del controlador se describe por medio de la Ecuación 2.21.

$$\beta K_p \quad (2.21)$$

El equivalente derivativo del controlador se describe por medio de la Ecuación 2.22.

$$\alpha K_d \quad (2.22)$$

2.1.2 IMPLEMENTACIÓN

El hardware del sistema difuso en lazo cerrado consiste en el PLC Modicon M580, la planta conformada por el variador de frecuencia y el motor trifásico de inducción, la etapa de realimentación conformada por el sensor de velocidad y el acondicionador del sensor que se han presentado en el esquema de la Figura 2.4.

2.1.2.1 ACONDICIONADOR

Como solución a la problemática de no contar con un módulo de conteo rápido en el bastidor del PLC para la lectura de frecuencia del encoder se ha optado por implementar una etapa de acondicionamiento a través del uso de un microcontrolador que realice esa lectura y genere una señal de salida en voltaje. Se ha seleccionado un Arduino Nano, ya que es un dispositivo compacto y económico. El Arduino Nano mediante el pin D5 realiza la lectura de la variación de frecuencia que genera el encoder, para ello detecta los flancos positivos en 1000 [ms]. El programa del Arduino realiza una relación de la variación de frecuencia a la entrada con una variación de la relación de trabajo de la PWM.

El motor trifásico de inducción tiene una velocidad nominal de 1670 [RPM], por lo tanto, en este trabajo se manejará el rango de velocidad de 0 – 1670 [RPM]. El sensor implementado es un encoder incremental de 500 pulsos por revolución en base a los datos de placa del instrumento. Para realizar la relación del rango de frecuencia de la señal de salida del encoder con la velocidad nominal del motor se considera la expresión:

$$f_{MAX} = 1670 \frac{rev}{min} \times 500 \frac{pulsos}{rev} \times \frac{1 min}{60 seg} = 13916 \frac{pulsos}{seg} \approx 13.9 kHz \quad (2.23)$$

Entonces se determina que el rango de frecuencia de salida del encoder es de 0 a 13.9 [kHz].

Con este rango se realiza la programación del microcontrolador para que realice la lectura de frecuencia, y genere una señal PWM de frecuencia 976.56 [Hz], en la que se varíe la relación de trabajo de 0 a 100%, se muestra la relación entre la velocidad del motor en [RPM], a la izquierda, con la frecuencia de salida del encoder.

$$0[RPM] \rightarrow 0[Hz] \quad (2.24)$$

$$1670 [RPM] \rightarrow 13916[Hz] \quad (2.25)$$

Luego de obtener la lectura de frecuencia, la señal es procesada y se obtiene una relación de porcentaje de PWM, donde el 0% corresponde a 0 [V] y el 100 % corresponde a 5 [V].

A continuación, que representa la variación de frecuencia debido a la velocidad del motor. A continuación, se muestra la relación entre la frecuencia en [Hz], a la izquierda, con la salida de % de PWM del Arduino Nano, a la derecha.

$$0[\text{Hz}] \rightarrow 0\% \text{ PWM} \quad (2.26)$$

$$13916 [\text{Hz}] \rightarrow 100\% \text{ PWM} \quad (2.27)$$

Debido a que la entrada de la señal analógica del PLC no reconoce los pulsos a una frecuencia $f_{PWM} = 976.56 [\text{Hz}]$, se ha implementado un filtro RC que tiene como objetivo obtener una señal de salida lo más semejante a una señal DC, de tal forma que el PLC M580 pueda reconocer la señal obtenida en una de sus entradas analógicas.

La Figura 2.5 muestra el esquema del algoritmo del acondicionador de señal del sensor. El Arduino Nano realiza la relación correspondiente del valor de frecuencia obtenido en un valor entero en el rango de 0 a 255 bits que representa el %PWM. Esta señal de salida se produce en el pin D6 y tiene una amplitud de 5 [V]

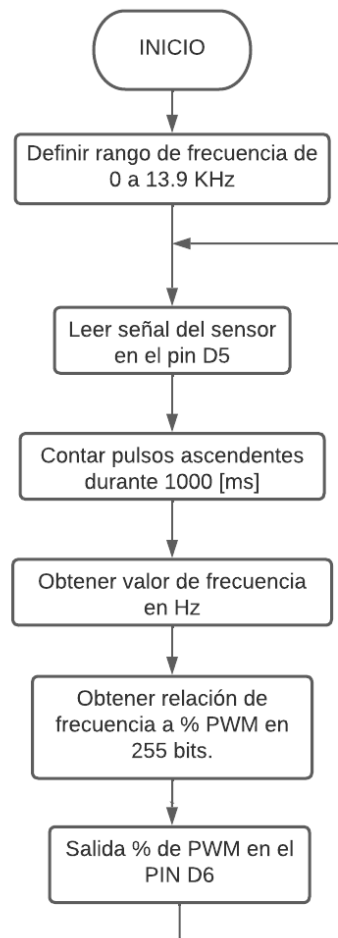


Figura 2.5 Algoritmo del Acondicionador

2.1.2.1.1 Diseño filtro RC

El diseño del filtro para obtener una señal DC se base en la configuración del filtro pasa bajos. Se conoce que el filtro pasa bajo solo permite pasar frecuencias hasta la frecuencia de corte diseñada.

La frecuencia de corte se define por la Ecuación 2.25

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.28)$$

Donde f_0 es la frecuencia de corte, R representa el valor resistencia y C el valor de capacitancia. Se define la salida de % de PWM del microcontrolador Arduino Nano en la frecuencia $f_{PWM} = 976.56$ [Hz].

Se asume $f_0 \ll f_{PWM}$ o $f_{PWM} = K \times f_0$ asumiendo $K = 6 \times 10^3$, entonces $f_0 = 0.162$ Hz. Por lo tanto, se asume un resistor $R = 22 \text{ K}\Omega$, entonces despejando C se obtiene:

$$C = \frac{1}{2\pi R f_0} = \frac{1}{2 \times \pi \times 22000 \times 0.162} = 44.656 \text{ uF} \approx 47 \text{ uF} \quad (2.29)$$

El esquema de conexión del filtro se observa en la Figura 2.6, donde la entrada del acondicionador es el puerto D5 y la salida de % de PWM es el puerto D6. La salida del acondicionador, A0, se encuentra conectada al filtro RC para obtener finalmente una señal analógica DC.

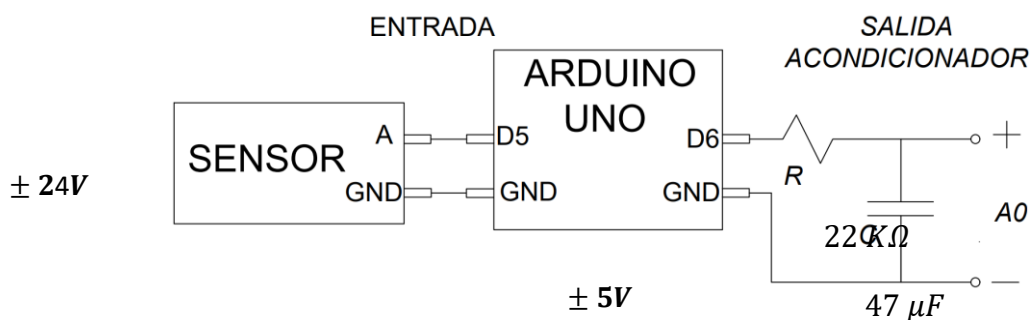


Figura 2.6 Esquema de conexión E/S del Acondicionador y filtro RC

De esta forma se obtiene una salida de voltaje DC, que representa la variación de velocidad del motor, y puede ser interpretada por las entradas analógicas del PLC M580.

Se debe considerar que la alimentación DC del sistema disponible para el sistema es 24 voltios, por consiguiente, en el diseño del acondicionador tiene una etapa de regulación de voltaje para alimentar el Arduino Nano con 5 voltios.

2.1.2.2 CONFIGURACIÓN DEL PLC M580

El PLC se configura para una entrada de valor entero 0 a 5000, ya que el acondicionador tiene una señal de salida de 0 [V] a 5 [V] que representa la variación de velocidad del motor desde 0 hasta su velocidad nominal de 1670 [RPM].

De esta forma se obtienen los valores que representan la señal de entrada analógica para realizar la programación del controlador en el PLC M580 mediante el software Unity Pro XL. El controlador lógico programable cuenta con salidas analógicas de 0 [V] a 10 [V] que permiten tener una señal de salida analógica hacia el variador.

El Modicon M580 cuenta con el módulo AMM 0600 de entradas y salidas analógicas. Para el módulo didáctico se ha escogido el canal 1 para la entrada analógica, y para la salida analógica se eligió el canal 5. Cada canal tiene una dirección que se representa en la Tabla 2.2

Tabla 2.2 Direcciones PLC

	VARIABLE	CANAL BMX AMM 0600	DIRECCIÓN PLC	RANGO	RANGO PLC
Entrada Analógica	Sensor	1	%IW0.4.0	0 – 5 [V]	0 – 5000
Salida analógica	Salida PLC	5	%QW0.4.4	0 – 10 [V]	0 – 10000

En la Tabla 2.2 se observa la variable correspondiente a la entrada analógica del PLC y a la salida analógica del PLC, su dirección y rango de operación.

Para seleccionar la entrada analógica del PLC, se define el canal 1. En el apartado de rango se define la opción de 0 a 5V, en escala se define el 0% como 0 INT y el 100% como 5000 INT tal como se muestra en la Figura 2.7.

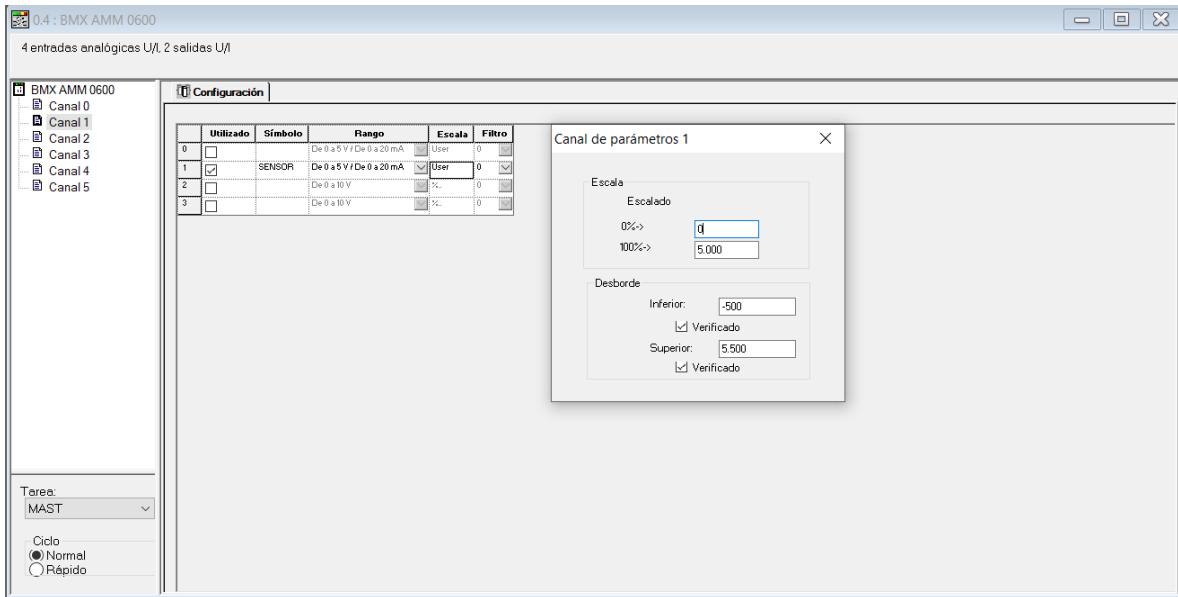


Figura 2.7 Configuración entrada PLC M580

Para configurar la salida analógica del PLC, se define el canal 5. En el apartado de rango se define la opción +/- 10V, para tener una salida de 0 a 10 [V]. En el apartado de escalado se define el 0% como -10000 INT y el 100% como 10000 INT tal como se muestra en la Figura 2.8.

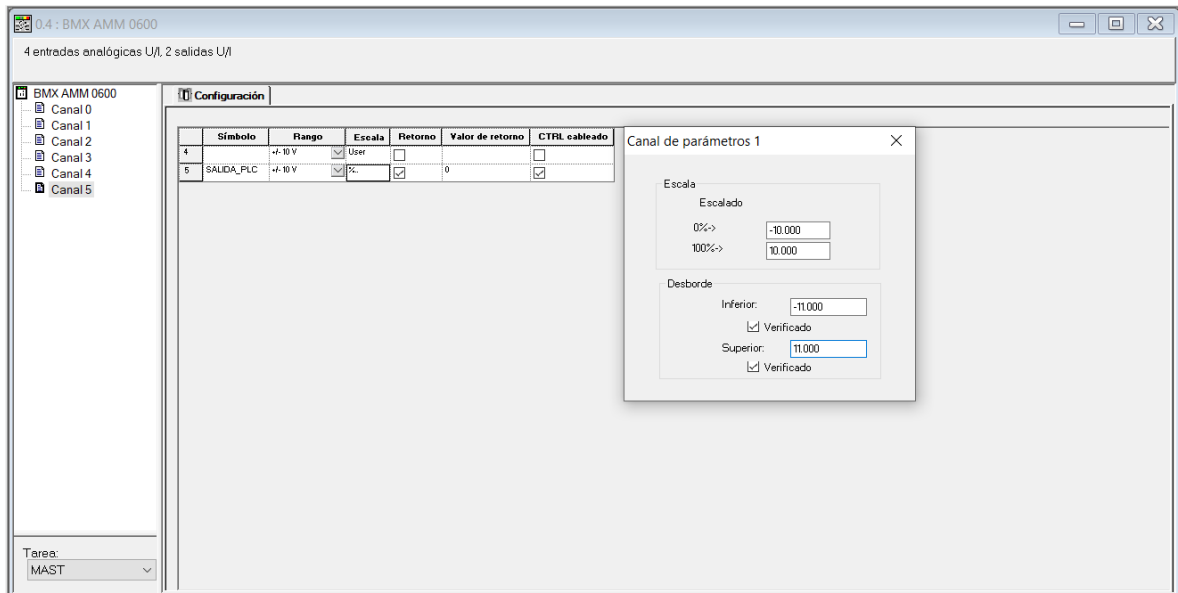


Figura 2.8 Configuración salida PLC M580

Finalmente, la planta implementada en la que consta todo el hardware configurado y descrito en los apartados anteriores es mostrado en la Figura 2.9, en la que se aprecia a) PLC,

2.1.2.3 IDENTIFICACION DE LA PLANTA

Para este apartado se utiliza el método de la curva de reacción en lazo abierto en el que se ingresa una señal tipo escalón a la planta observar la respuesta a la salida [31]. En base a las características del sistema [32], se obtiene una planta de primer orden con tiempo muerto representado matemáticamente por la Ecuación 2.30.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (2.30)$$

Con el método en mención se obtienen los parámetros de K , τ y t_0 de manera experimental, cuyo procedimiento se describe como sigue.

Inicialmente se debe esperar que el proceso llegue a estado estable luego de la desconexión del controlador [31]. El segundo paso es realizar un cambio tipo escalón, de un porcentaje adecuado para registrar los tiempos, en la señal de salida del controlador [31]. Finalmente se debe registrar los tiempos, t_1 al 28.3% y el tiempo t_2 al 63.2% [14], como se muestra en la Figura 2.9.

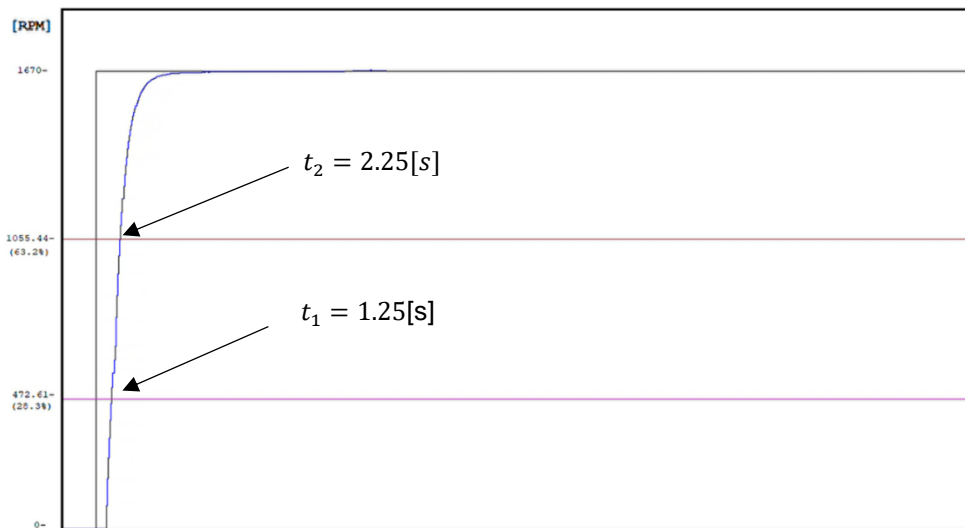


Figura 2.9. Prueba lazo abierto

Se ha realizado la prueba con un escalón del 0 a 10000 (0 a 10V) para pasar de 0 [RPM] a 1670 [RPM] (velocidad nominal). La planta, variador – motor, responde rápidamente a la señal de entrada como se puede observar en la Figura 2.9.

Para la identificación de la planta se requiere conocer cuánto varía la salida por el cambio en la entrada, es decir, conocer cuánto afecta la entrada en la salida de la planta [33]. Se describe como ganancia a la sensibilidad que hay entre la variable de entrada y la variable de salida del sistema [31].

La variación de la entrada es:

$$\Delta U = 10000 - 0 = 10000 \quad (2.31)$$

La variación de la salida es:

$$\Delta Y = 1670 - 0 = 1670 \quad (2.32)$$

La ganancia, K , está en función de los parámetros de operación del sistema y de las propiedades físicas [34]. En la ecuación 2.33 se describe esta relación.

$$K = \frac{\Delta \text{Variable de salida}}{\Delta \text{Variable de entrada}} = 0.167 \quad (2.33)$$

Para obtener los parámetros de la planta se aplican las Ecuaciones 2.34 y 2.35 [9]:

$$\tau = 1.5 \times (t_2 - t_1) = 1.5 \times (2.25 - 1.25) = 1.5[s] \quad (2.34)$$

$$t_0 = t_2 - \tau = 2.25 - 1.5 = 0.75[s] \quad (2.35)$$

Finalmente, la planta tiene el modelo aproximado:

$$G(s) = \frac{0.167}{1.5s + 1} e^{-0.75s} \quad (2.36)$$

$$K_p = \frac{1.2}{K} \times \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{-1} = \frac{1.2}{1} \times \left(\frac{0.75}{1.5}\right)^{-1} = 2.4 \quad (2.37)$$

$$t_i = 2 \times t_0 = 2 \times 0.75 = 1.5 \quad (2.38)$$

$$t_d = \frac{t_0}{2} = 0.375 \quad (2.39)$$

Se realiza el paso de los valores del PID real a los valores de un PID ideal [31].

$$K_c = K_p \times \left(1 + \frac{t_d}{t_i}\right) = 17.9625 \quad (2.40)$$

$$t_i' = t_i + t_d = 1.875 \quad (2.41)$$

$$t_d' = \frac{t_i \times t_d}{t_i + t_d} = 0.3 \quad (2.42)$$

Entonces se obtienen las constantes del controlador PID:

$$PID = K_c \times \left(1 + \frac{1}{t_i'} + t_d'\right) \quad (2.43)$$

$$K_{proporcional} = 17.9625 \quad (2.44)$$

$$k_{Integral} = 9.58 \quad (2.45)$$

$$K_{derivativa} = 5.3887 \quad (2.46)$$

2.1.2.4 PROGRAMACIÓN DE LOS CONTROLADORES EN UNITY PRO XL

La programación ha sido implementada en el software Unity Pro XL , y se ha escogido el lenguaje de programación FBD porque el software cuenta con varias librerías con bloques de funciones especializados [17]. Para la programación de los controladores en el PLC M580 ePAC [35] se utiliza el bloque exponencial para el algoritmo de la función de pertenencia gaussiana. Como se ha descrito en el esquema de la Figura 2.4, la arquitectura de los controladores difusos requiere de una etapa derivativa y una etapa integral.

2.1.2.4.1 Configuración del bloque derivador

El software cuenta con una librería con varios bloques para realizar la derivación, se usa el bloque “DERIV” que se muestra en la Figura 2.10. Este bloque se puede activar con una variable booleana de valor igual a uno lógico en “EN” y para desactivar se establece el valor de la variable en cero lógico[17].

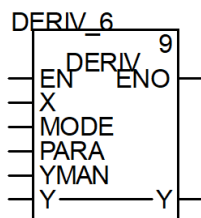


Figura 2.10 Bloque derivador

En la figura 2.10 se observan en la parte izquierda los parámetros de entrada del bloque derivador. En “X” se define la variable de tipo real que se integrará. En el apartado de entrada de “MODE”, se define “MAN” y “HALT” en cero lógico para que funcione en modo automático y en modo de no parada. En el apartado de “PARA” en “gain” se especifica un valor real igual a uno.

2.1.2.4.2 Configuración del bloque integrador

Adicionalmente se ha usado usa el bloque integrador llamado “INTEGRATOR” y que se muestra en la Figura 2.11. Este bloque se puede activar con una variable booleana de valor uno lógico en “EN” y para desactivar se establece el valor de la variable en cero lógico[17].

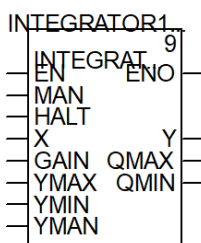


Figura 2.11 Bloque integrador

Se debe configurar los parámetros de entrada del bloque integrador que se muestra en la Figura 2.11. Para la entrada del bloque “MAN” se establece una variable booleana igual cero para indicar que va a funcionar en modo automático [35] . Para la entrada del bloque “HALT” se usa una variable booleana igual a cero para especificar que no se usará el “Modo parada” [17]. La variable de tipo real que se requiere integrar se especifica en “X”. Se define una variable de tipo entero, INT, en 10000 para YMAX. Esto representa que la salida máxima del controlador corresponderá a la máxima salida de voltaje del PLC [35]. El valor de entrada de YMIN se define en cero porque la integración comienza desde cero.

2.1.2.4.3 Creación de librerías para controladores difusos

La creación de librerías derivadas facilita la programación porque se pueden programar funciones especializadas en un solo bloque. La librería diseñada contiene la lógica de los controladores programada en lenguaje FBD.

Para la creación de estas librerías, en el apartado de vista estructural del proyecto se crea un nuevo elemento como se muestra en 1 de la Figura 2.11. Se debe definir las variables para las entradas y salidas del bloque, la carpeta “Privado” contiene las variables usadas en el programa del bloque como se muestra en 2. Luego de generar los cambios, los bloques creados serán parte del conjunto de librerías del programa. También se debe considerar el tipo de variable que se define para las entradas o salidas del bloque porque de esto dependerá el tipo de variable que se deba crear para su uso.

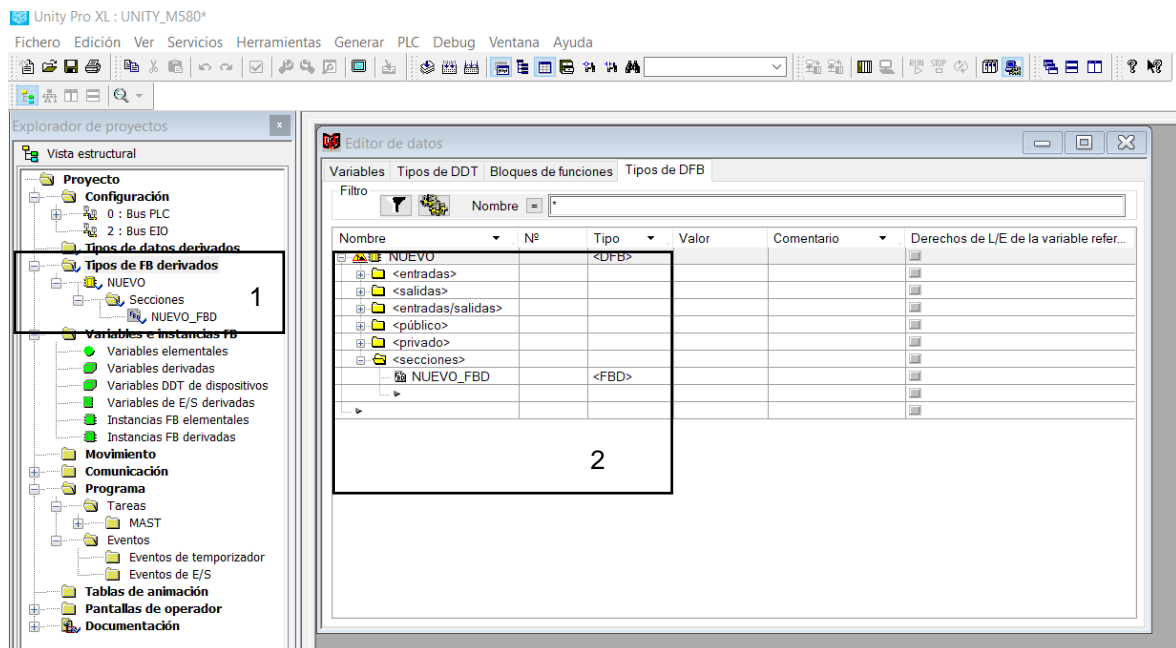


Figura 2.11 Creación de librerías

Estas librerías contienen la programación de la lógica difusa de los controladores en su bloque respectivo como se muestra en la Figura 2.12. Los algoritmos que contienen lógica de los controladores difusos en el PLC fueron desarrollados en base a lo descrito en este capítulo. También se crearon bloques para las variables lingüísticas, para la etapa de fuzzificación, para los mecanismos de inferencia de los dos controladores difusos, para la etapa de defuzzificación, de tal forma que se pudo agrupar en bloques las distintas etapas de programación de los algoritmos del sistema de control difuso.

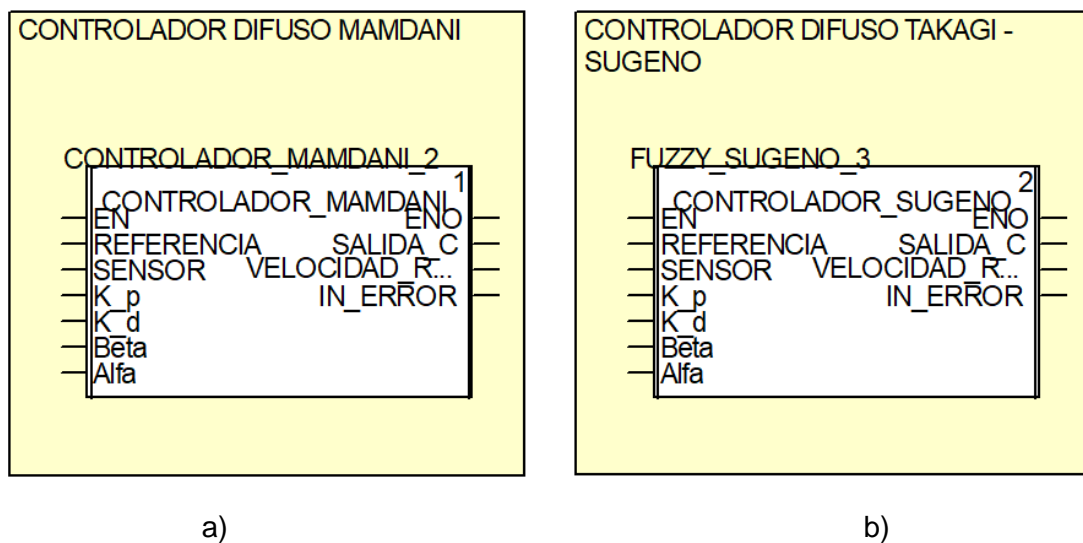


Figura 2.12 a) Librería controlador difuso Mamdani b) librería controladora difuso Takagi – Sugeno

Para la facilidad del manejo de los bloques se pueden activar o desactivar mediante una variable booleana en la entrada “EN” que se muestra en la Figura 2.12. Se define en el parámetro de “REFERENCIA” la variable real correspondiente a la velocidad deseada del motor en revoluciones por minuto. En el parámetro de entrada de “SENSOR” se debe definir la variable tipo entero que corresponde a la lectura del acondicionador. Los parámetros “ k_p ”, “ k_d ”, *Beta* y *Alfa*” son variables reales y corresponde a las ganancias del controlador. El parámetro de salida del bloque “SALIDA_C” corresponde a la variable de tipo real para la salida del controlador. Se define una variable de tipo real para el parámetro de salida “VELOCIDAD_R”. El parámetro “IN_ERROR” requiere de una variable de tipo real y muestra el error en revoluciones por minuto.

2.1.2.5 PROGRAMACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

Debido a las especificaciones del motor se escogió el modelo de variador de frecuencia monofásico de 220[V]. Como el motor trifásico de inducción tiene una potencia de 0.4474 kilo vatios, el variador de frecuencia de 0.75 kilo vatios, AD100 – 2T, es buena opción.

Para configurar el variador de velocidad se hizo uso del manual de instrucciones. En el panel del dispositivo, se debe ingresar al menú de configuración y especificar lo mostrado en la Tabla 2.3 [19]:

Tabla 2.3 Configuración Variador de frecuencia

Código de función	Nombre	Opción
P0.	Parámetros básicos	
P0.00	Selección de modo de control	2: Lazo cerrado con sensor externo
P0.03	Modo de funcionamiento	2: AI1 Analógico -10 V a 10 V
P0.04	Frecuencia	60 Hz
P0.05	Límite frecuencia máxima	60 Hz
P2.	Parámetros motor	
P2.01	Tipo de motor	0: Motor Asíncrono
P2.02	Potencia del motor	0.44742 KW
P2.03	Frecuencia del motor	60 Hz
P2.04	Velocidad nominal	1670 RPM
P2.04	Voltaje de operación	220 V
P2.06	Corriente	2.3 A
P8.	Parámetros auxiliares	
P8.00	Unidad de tiempo rampas de aceleración	1: 0.1s
P8.01	Rampa aceleración ascendente	10 s
P8.02	Rampa de aceleración descendente	10 s

Con las especificaciones de la Tabla 2.3, el variador se configura para el motor trifásico de inducción disponible. Se debe considerar que los tiempos de las rampas de aceleración y desaceleración no deben ser muy bajos [19]. Como el motor no está acoplado a ninguna carga, se definió el tiempo para la rampa de aceleración igual a 10.

2.1.2.6 INTERFAZ DE USUARIO

Para poder observar en línea el comportamiento de la planta, se ha desarrollado una interfaz de usuario mediante el software Unity Pro XL en un computador. En la Figura 2.11 se muestra la interfaz de usuario. Donde se tiene la referencia de velocidad, la salida de la

planta y la señal de control, al usar los controladores difusos de Mamdani, Takagi – Sugeno o PID. La interfaz, que se muestra en la Figura 2.10 cuenta con el apartado uno, A1.1 y el apartado A1.2, para el ingreso de ganancias de los controladores difusos y PID respectivamente, el apartado dos, A2, permite el ingreso de la referencia de velocidad en [RPM]. El apartado A3 muestra la velocidad del motor en [RPM] y el error en [RPM]. El apartado A4 muestra los índices ISE (Integral Square Error) y el IAE (Integral Absolute Error) de cada uno de los controladores. Finalmente, el apartado A6 muestra la acción de control aplicada a la planta. La información de los controladores se muestra en los apartados A3 Y A4; el controlador Mamdani se mostrará en los cuadros de bordes azules, la información del controlador Takagi – Sugeno se mostrará en los cuadros de color rojo y la información del controlador PID se mostrará en los cuadros de bordes verdes. Dentro del apartado A5 se muestra la referencia y la salida de la planta con el controlador, la salida de la planta con el controlador Mamdani se representará con línea azul, con el controlador Takagi – Sugeno se representará con línea roja y para el controlador PID.

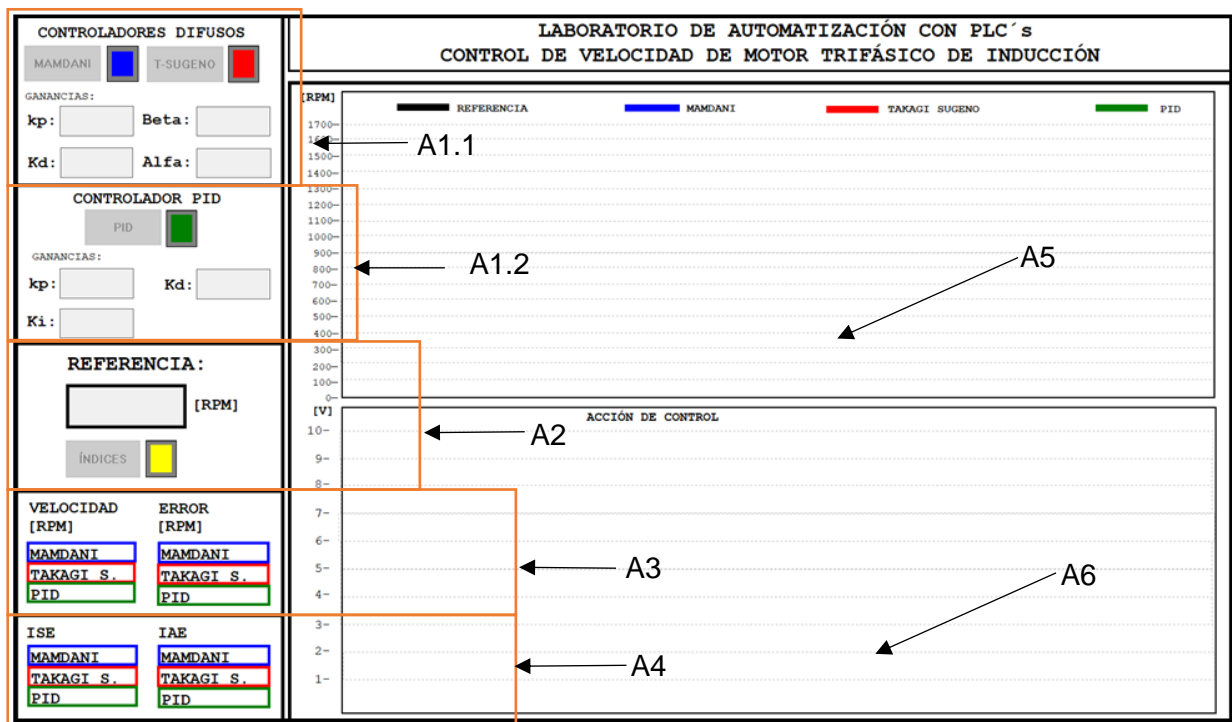


Figura 2.11 Interfaz gráfica

2.1.2.7 CONEXIÓN DEL SISTEMA

2.1.2.7.1 Diagrama eléctrico

En la Figura 2.12 se muestra el diagrama eléctrico de la planta. El variador de frecuencia se conecta al motor trifásico de inducción el cual se encuentra conectado en “Y” como se observa en la Figura 2.12a. El sistema cuenta con un pulsador de paro de emergencia para

desactivar la alimentación del variador de frecuencia, mientras que el contactor KM1 pertenece al tablero principal de alimentación. El diagrama eléctrico del pulsador se aprecia en la Figura 2.12b.

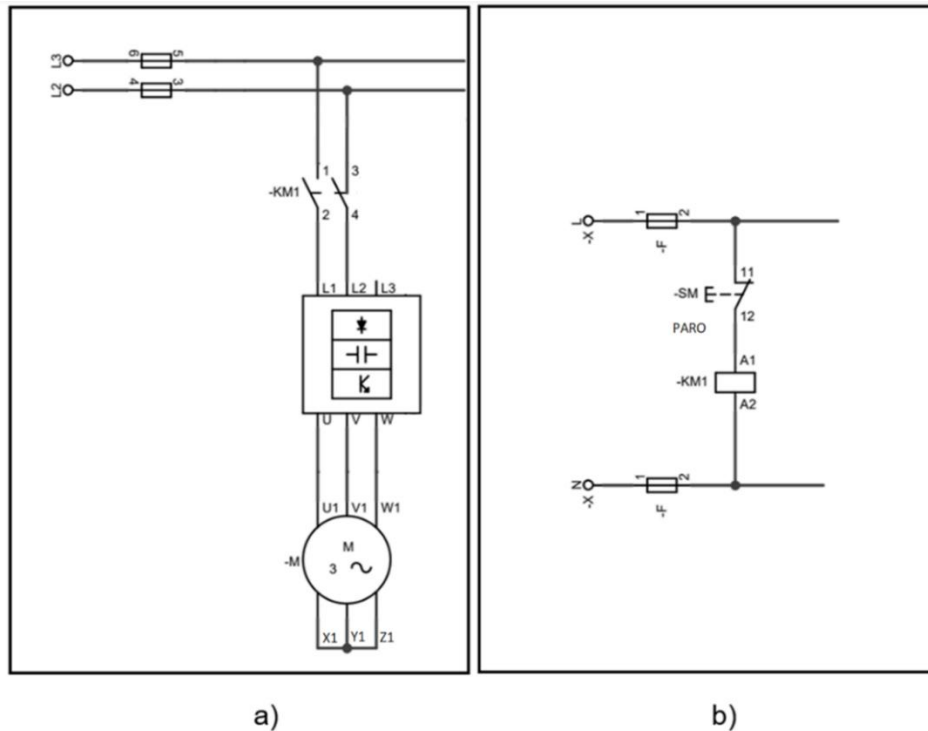


Figura 2.12 Diagrama eléctrico

2.1.2.7.2 Conexionado

A continuación, se muestra en la Figura 2.13a la conexión del tablero del variador de frecuencia al que está conectado el motor. En el tablero de la Figura 2.13b se observa en la parte superior el apartado de la conexión del motor y el apartado inferior los terminales del acondicionador.

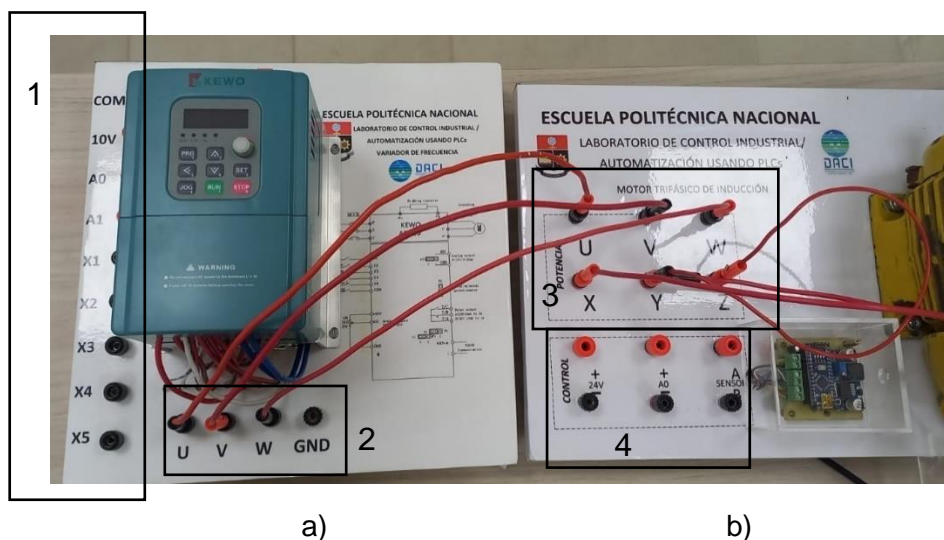


Figura 2.13 a) Conexión del variador de frecuencia, conexión del acondicionador

En la Figura 2.13 en el recuadro 1 se muestra los terminales físicos del variador de frecuencia, mientras que en la parte superior (atrás del variador) se encuentra la alimentación del variador. La señal de control, la cual sale del PLC M580 se conecta en los terminales “COM” y “A1”. En el recuadro 2 se presentan los terminales de salida del variador de frecuencia que van conectados a los terminales “U, V y W” (recuadro 3). En el recuadro 4 se observa los terminales de conexión del acondicionador del encoder, en la parte izquierda en +- 24 voltios se conecta la alimentación del sensor de velocidad y del acondicionador. En los conectores +- A0 se obtiene la señal de salida del acondicionador. Esta señal de voltaje se conecta a la entrada analógica del PLC M580. En los conectores A y B se pueden obtener las señales del encoder sin ser acondicionadas.

En la Figura 2.14 en 1 se observa el PLC M580 con sus bornes de conexión de entradas y salidas.

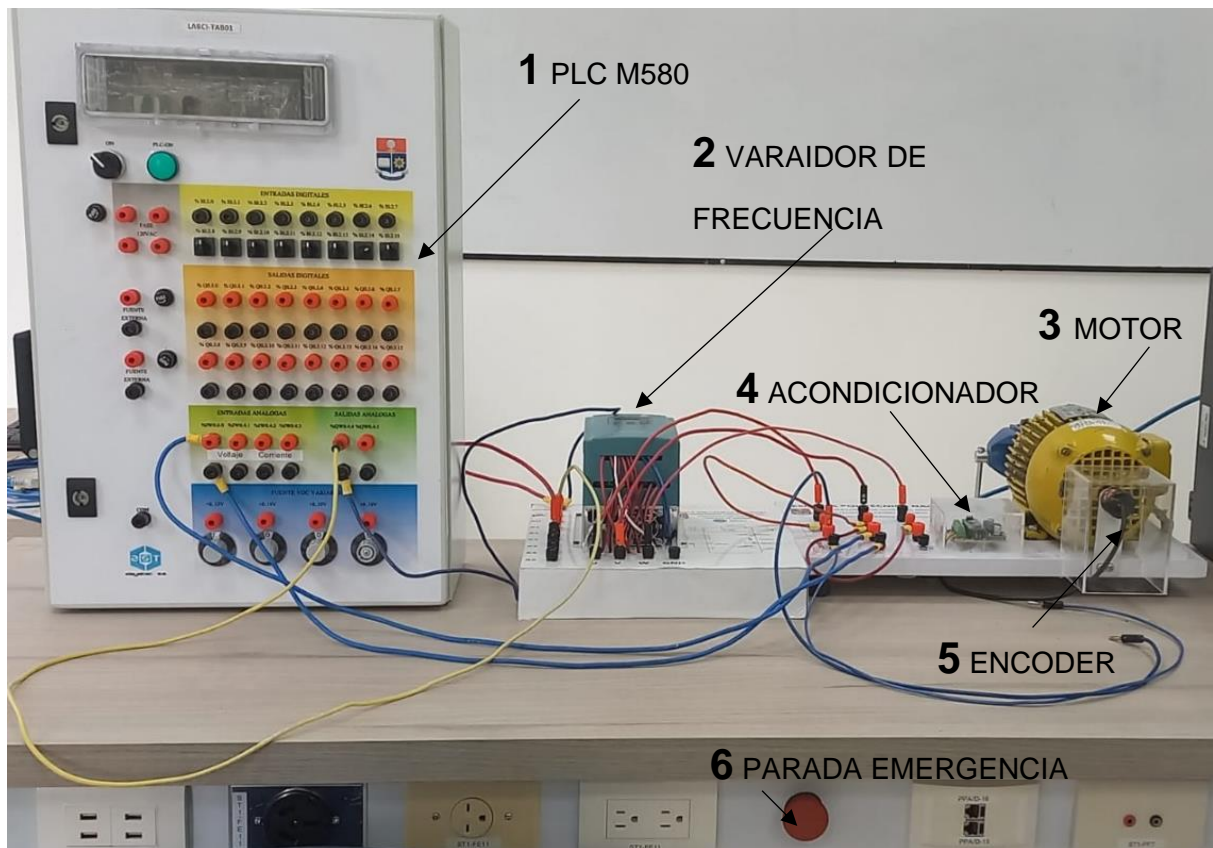


Figura 2.14 Sistema Implementado

En 2 se observa el variador de frecuencia que va conectado al motor trifásico de inducción mostrado en 3. El lugar donde se encuentra el acondicionador de señal se muestra en 4. En la parte 5 se muestra el sensor de velocidad que fue acoplado al eje del motor, mientras que 6 muestra el pulsante de paro de emergencia del sistema.

A continuación, se muestra en la Figura 2.15 el diagrama de conexiones de todo el sistema.

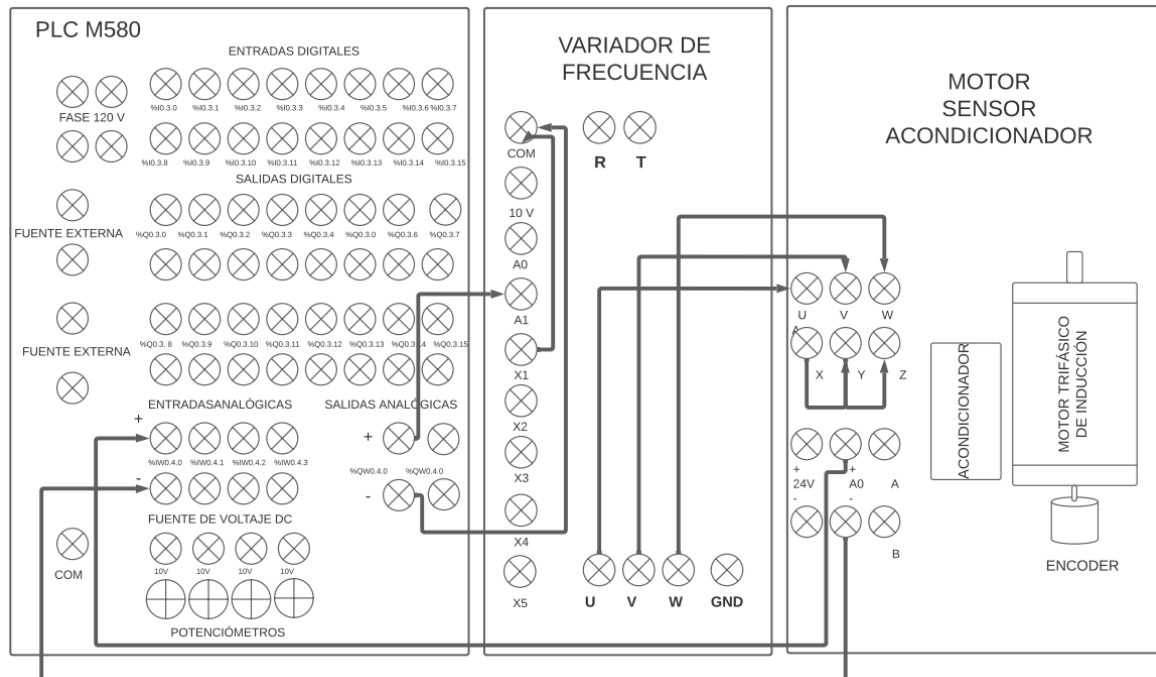


Figura 2.15 Conexión del sistema

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

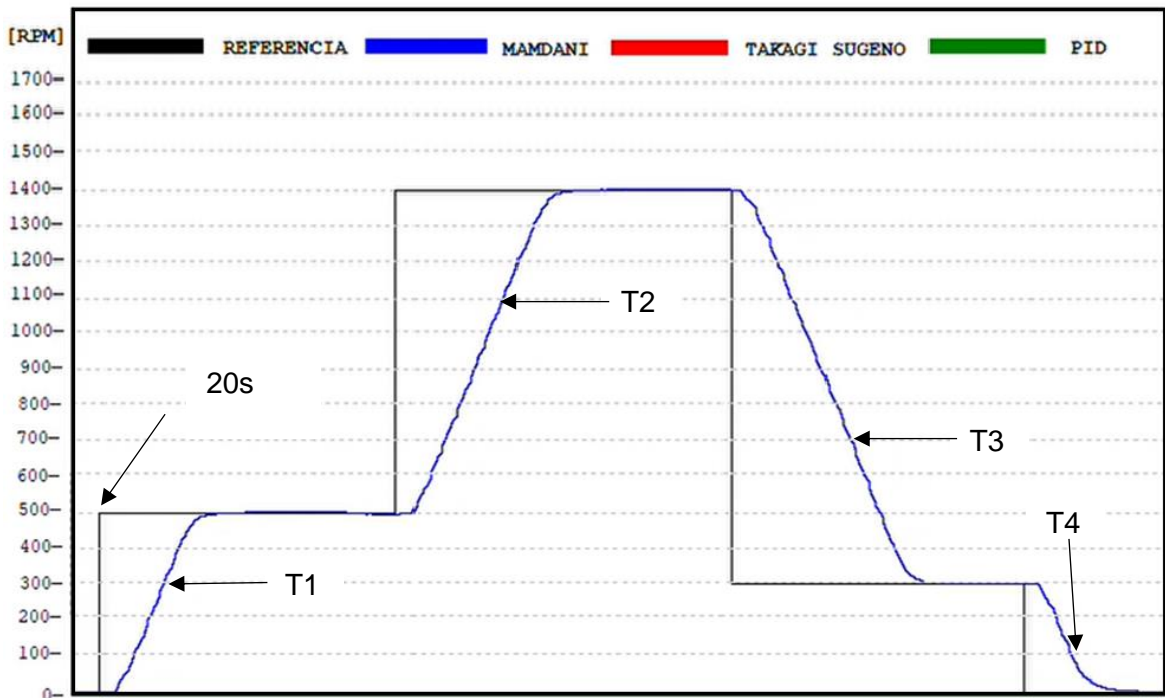
Para realizar el análisis del rendimiento de los controladores, se han realizado pruebas mediante cambios de referencia de velocidad ascendentes y descendentes en revoluciones por minuto, y además se ha ingresado una perturbación mecánica al eje del motor, haciendo que este tienda a frenarse para observar la respuesta de cada controlador. En cada cambio de referencia se ha medido los índices de desempeño ISE e IAE de cada controlador para comprobar su desempeño de manera cuantitativa.

3.1.1 CAMBIOS DE REFERENCIA ASCENDENTES Y DESCENDENTES

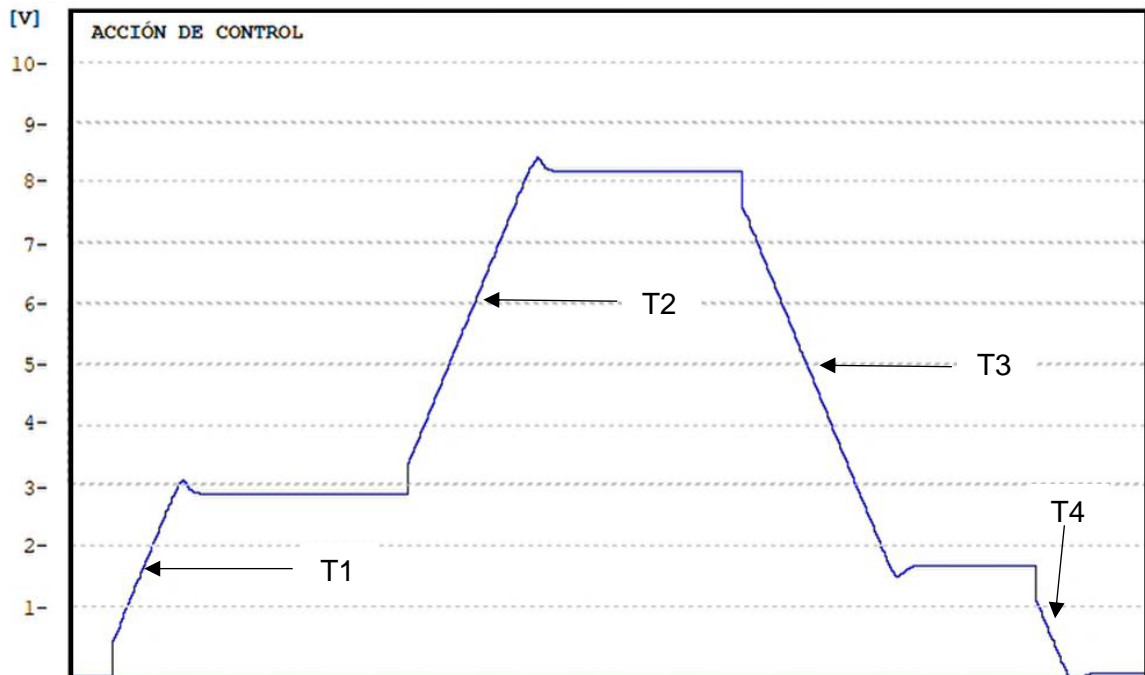
En este experimento se aplican dos cambios ascendentes y dos cambios descendentes de referencia con la finalidad de observar la respuesta de los controladores. El tiempo entre cada transición de una velocidad a otra es de 20 [s].

3.1.1.1 CONTROLADOR DIFUSO MAMDANI

En la Figura 3.1 se muestra la referencia en línea negra y cómo se comporta la salida de la planta en línea azul, usando el controlador difuso Mamdani, ante cambios de referencia ascendentes y descendentes.



(a)



(b)

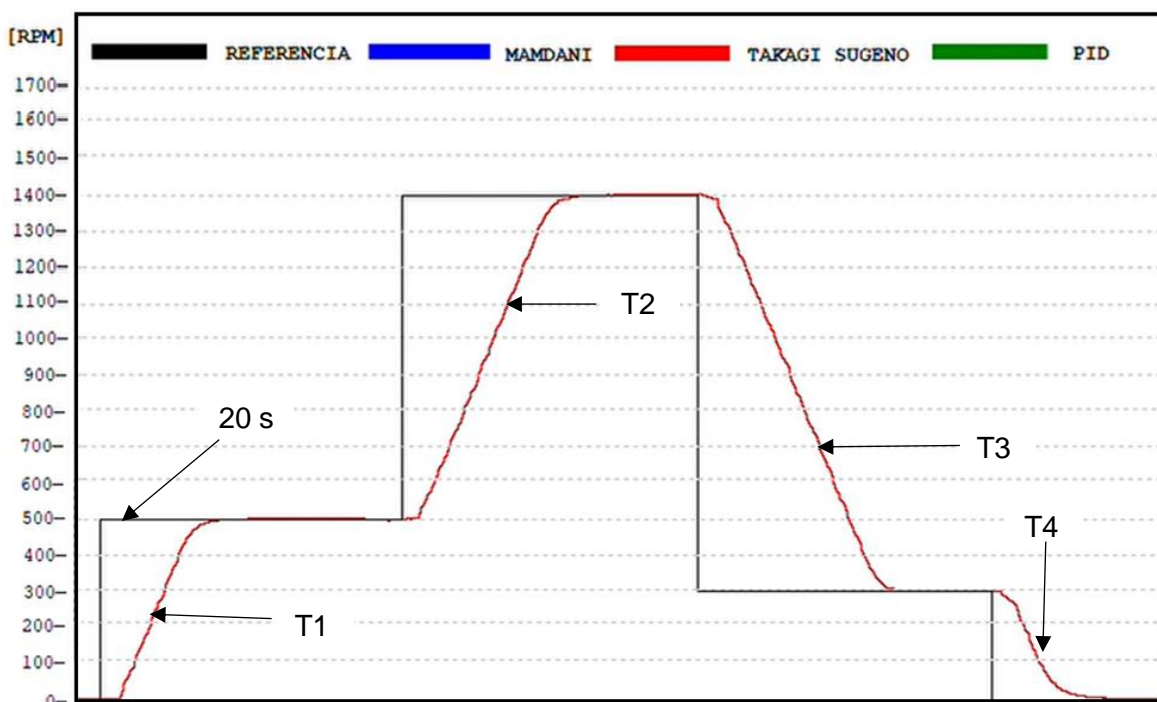
Figura 3.1 a) Referencia y salida de la planta usando controlador difuso Mamdani, b) Acción de Control

En la Figura 3.1a se observa que la salida de la planta usando el controlador difuso Mamdani varía suavemente a cambios de referencia ascendentes de velocidad, como muestra la transición T1 de 0 [RPM] a 500 [RPM] y la transición T2 de 500 [RPM] a 1400 [RPM]. De la misma forma, el comportamiento de la salida de la planta es suave ante cambios de referencias descendentes como se puede observar en las transición T3 de 1400 [RPM] a 300 [RPM], y transición T4 de 300 [RPM] a 0 [RPM].

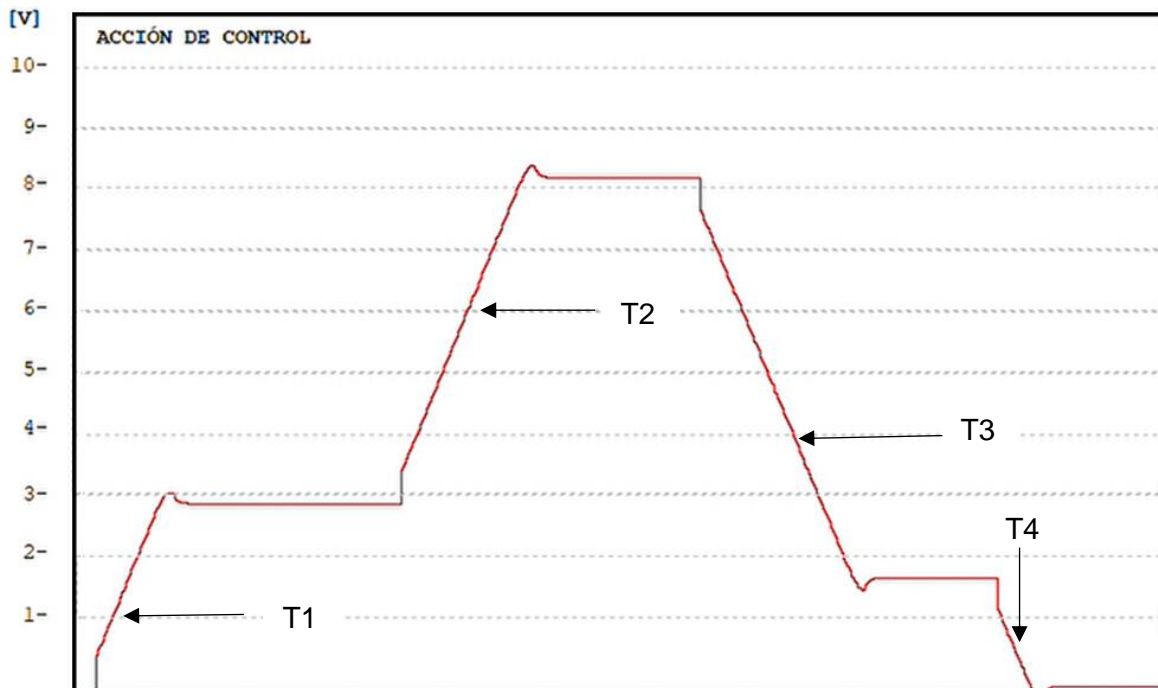
En la Figura 3.1b se observa la acción de control del controlador difuso Mamdani, en un rango de 0 a 10 V. En la gráfica se aprecia que la salida del controlador es suave y se tiene un leve sobre impulso en las transiciones. Cabe notar que estos sobre impulsos no se ven reflejados en la salida de la planta.

3.1.1.2 CONTROLADOR DIFUSO TAKAGI – SUGENO

En la Figura 3.2a se muestra la referencia en línea negra y el comportamiento de la salida de la planta en línea roja usando el controlador difuso Takagi – Sugeno ante cambios de referencia ascendentes y descendentes.



(a)



(b)

Figura 3.2 a) Referencia y salida de la planta usando controlador difuso T – S, b) Acción de Control

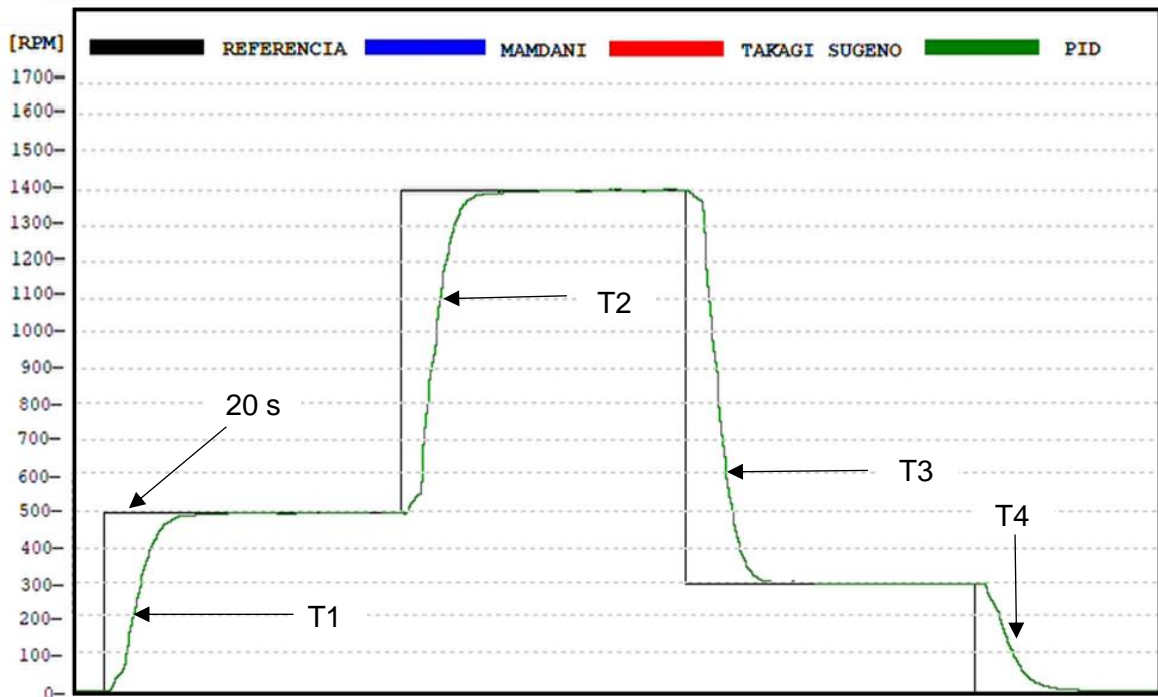
En la Figura 3.2a se observa que la salida de la planta usando el controlador difuso Takagi – Sugeno varía suavemente a cambios de referencia ascendentes de velocidad, como muestra la transición T1 de 0 [RPM] a 500 [RPM] y la transición T2 de 500 [RPM] a 1400 [RPM]. De la misma forma, el comportamiento de la salida de la planta es suave ante cambios de referencias descendentes como se puede observar en la transición T3 de 1400 [RPM] a 300 [RPM], y transición T4 de 300 [RPM] a 0 [RPM].

En la Figura 3.2b se observa la acción de control del controlador difuso Takagi – Sugeno, en un rango de 0 a 10 V. En la gráfica se aprecia que la salida del controlador es suave y se tiene un leve sobre impulso en las transiciones. Estos sobre impulsos tampoco se ven reflejados en la salida de la planta.

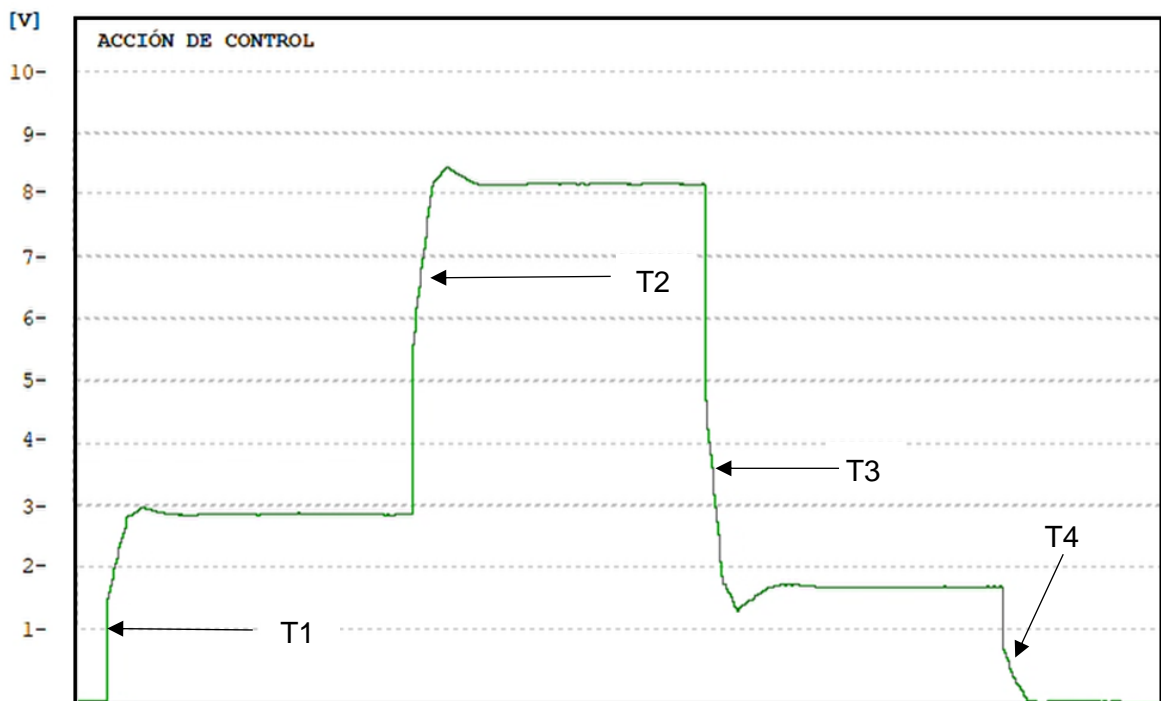
3.1.1.3 CONTROLADOR PID

3.1.1.3.1 Salida de la planta

En la Figura 3.3a se muestra la referencia en línea negra y el comportamiento de la salida de la planta en línea roja usando el controlador PID ante cambios de referencia ascendentes y descendentes.



(a)



(b)

Figura 3.3 a) Referencia y salida de la planta usando controlador PID, b) Acción de Control

En la Figura 3.3a se observa que la salida de la planta usando el controlador PID varía rápido a cambios de referencia ascendentes de velocidad, como muestra la transición T1 de 0 [RPM] a 500 [RPM] y la transición T2 de 500 [RPM] a 1400 [RPM]. De la misma forma,

el comportamiento de la salida de la planta es rápida ante cambios de referencias descendentes como se puede observar en la transición T3 de 1400 [RPM] a 300 [RPM], y transición T4 de 300 [RPM] a 0 [RPM]. En la Figura 3.3b se observa la acción de control del controlador PID, en un rango de 0 a 10 V. En la gráfica se aprecia que la salida del controlador es rápida y se tiene un leve sobre impulso en las transiciones ascendentes y un sobre impulso mayor en las transiciones descendentes.

3.1.2 INGRESO DE PERTURBACIÓN A LA PLANTA

Para el ingreso de perturbación mecánica a la planta que consta del motor trifásico de inducción conectado al variador de frecuencia, se usa una entenalla compacta que fue modificada colocando placas de caucho en la mordaza móvil y la mordaza fija. Se ajusta la entenalla al módulo, en el lugar donde se encuentra el eje del motor, el cual no se encuentra conectado a ninguna carga, de tal forma que al cerrar la mordaza móvil se produce un rozamiento entre la placa de caucho y el eje metálico del motor se muestra en la Figura 3.4. El rozamiento producido entre el caucho de la mordaza y el eje metálico producirá una reducción de la velocidad del eje del motor respecto a la velocidad de referencia. Esta reducción de la velocidad de referencia en RPM del motor será compensada mediante un incremento de la acción de control, que es el voltaje dentro de un rango de 0 a 10 [V] generado desde el PLC. Luego de abrir la mordaza móvil, hasta eliminar la perturbación, la planta tendrá un incremento de velocidad ya que la acción de control había aumentado para compensar la perturbación.

Se debe considerar que la perturbación por parte de la entenalla no puede ser especificada o medida, de tal forma que se realiza el cierre de la mordaza móvil con el número específico de dos vueltas para la manivela. De esta forma se pretende ingresar el mismo nivel de perturbación a la planta y comprobar el comportamiento de los controladores difusos y PID.

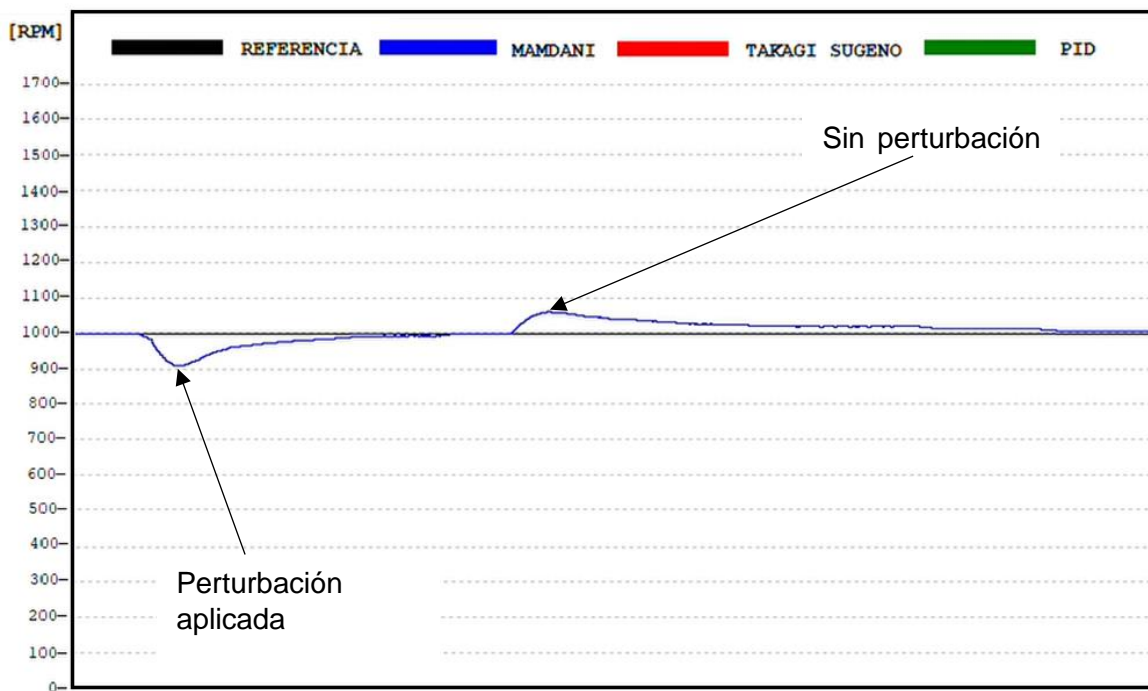


Figura 3.4 Mecanismo de perturbación

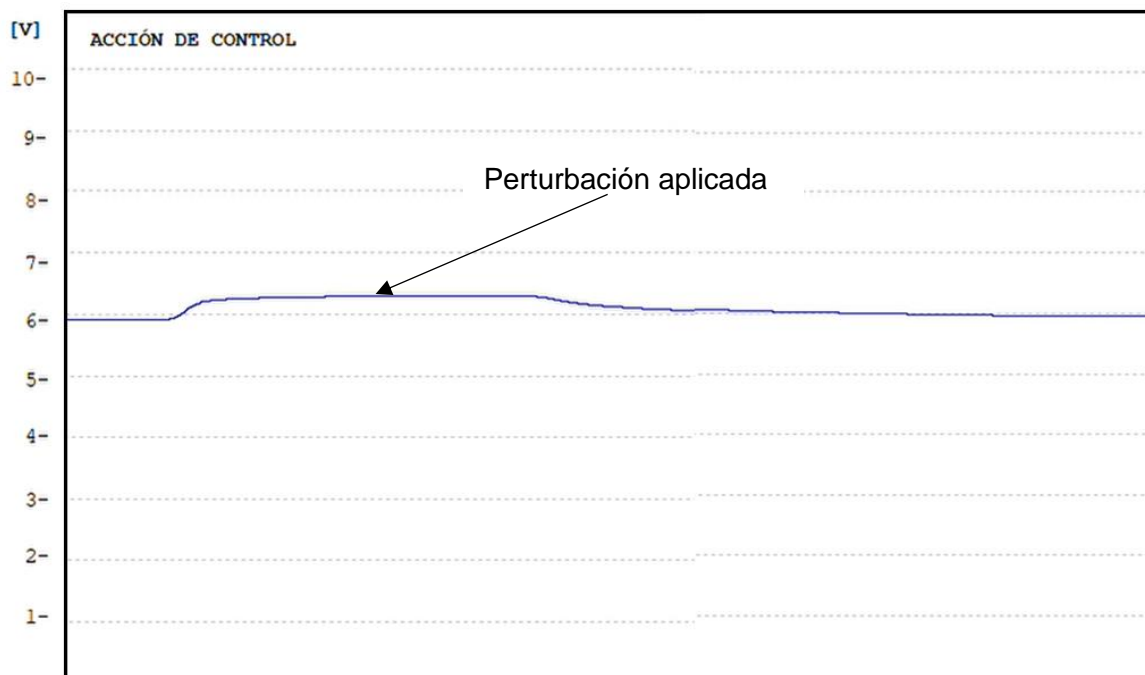
3.1.2.1 CONTROLADOR DIFUSO MAMDANI CON PERTURBACIÓN

3.1.2.1.1 Planta con perturbación usando controlador difuso Mamdani

En la Figura 3.5a se muestra el comportamiento de la salida de la planta en línea azul, usando el controlador difuso de Mamdani, ante el ingreso y eliminación de la perturbación mecánica.



(a)



(b)

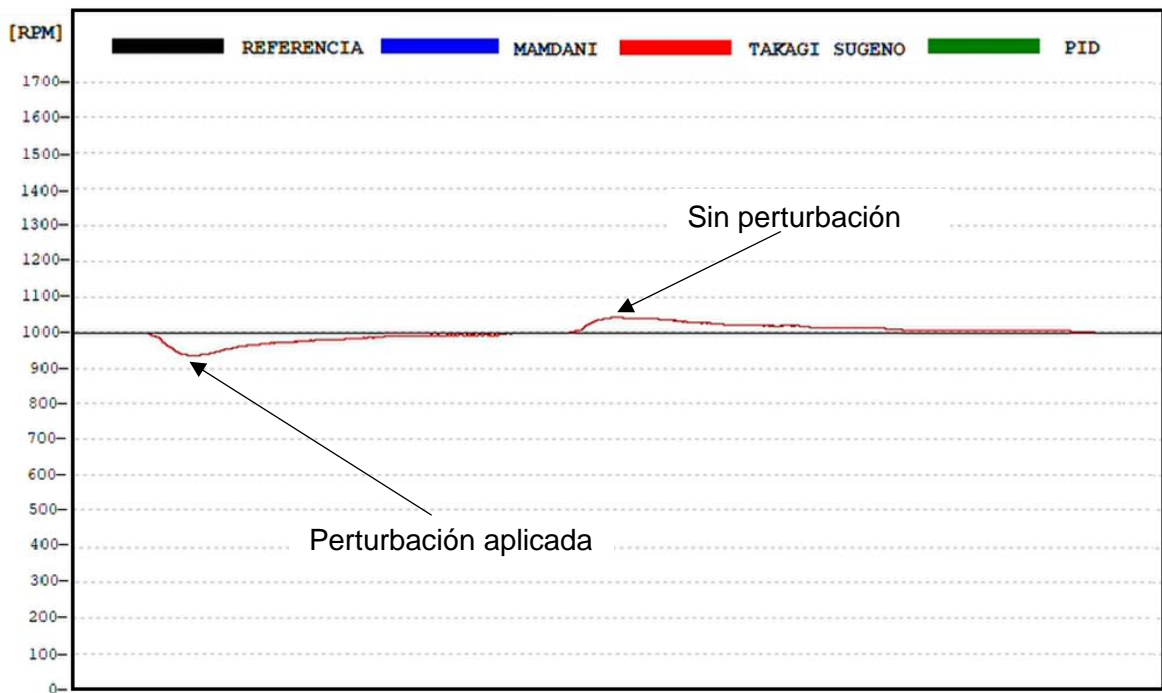
Figura 3.5 a) Referencia y salida de la planta con perturbación usando controlador difuso Mamdani, b) Acción de Control

En la Figura 3.5a se observa en el instante que ingresa la perturbación mecánica al eje del rotor, que la velocidad del motor disminuye como se observa en “Perturbación aplicada”. El controlador difuso Mamdani compensa la reducción de velocidad, de forma moderada, hasta llegar nuevamente a la referencia de velocidad especificada. Al eliminar la perturbación se puede observar en “Sin perturbación” que la velocidad que aumentó llega a la referencia moderadamente. Cuando la salida de la planta es compensada y se retira la perturbación mecánica se puede observar en “Sin perturbación” como el cambio de velocidad en RPM de la planta es menor respecto al cambio producido en la planta con perturbación. La respuesta del controlador difuso Mamdani es buena y llega al estado estable sin problema con buen desempeño.

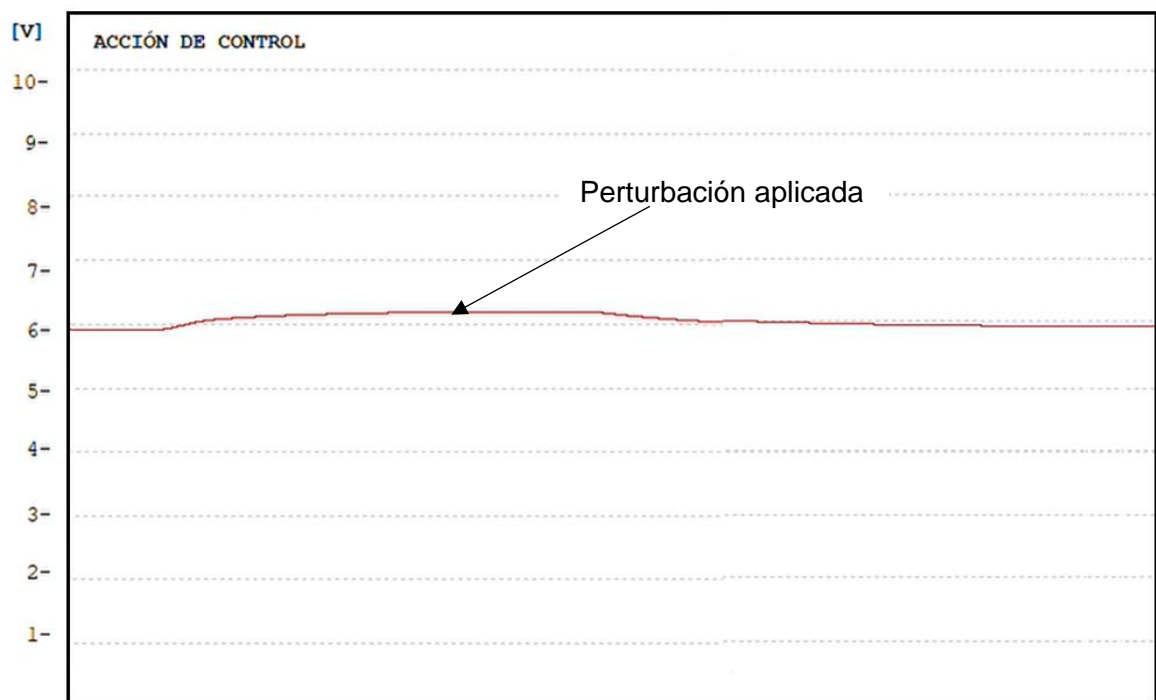
En la Figura 3.5b se observa en línea azul la acción de control del controlador difuso Mamdani. En el instante que ingresa la perturbación mecánica al eje del rotor, la velocidad del motor disminuye, de forma que el controlador aumenta la salida, que corresponde a la salida analógica de voltaje del PLC M580 para volver nuevamente a la referencia de velocidad en [RPM]. Como se observa en el instante de “Perturbación máxima” La acción de control es muy suave y lenta, pero compensa la reducción de velocidad.

3.1.2.2 CONTROLADOR DIFUSO DE TAKAGI – SUGENO CON PERTURBACIÓN

En la Figura 3.6a se muestra cómo se comporta la salida de la planta en línea roja, usando el controlador difuso Takagi – Sugeno, ante el ingreso y eliminación de la perturbación mecánica.



(a)



(b)

Figura 3.6 a) Referencia y salida de la planta con perturbación usando controlador difuso T – S, b) Acción de Control

Como se observa en la Figura 3.6b que en el instante que ingresa la perturbación mecánica al eje del rotor, la velocidad del motor disminuye como se observa en el instante de "Perturbación aplicada". El controlador difuso Takagi – Sugeno compensa la reducción de

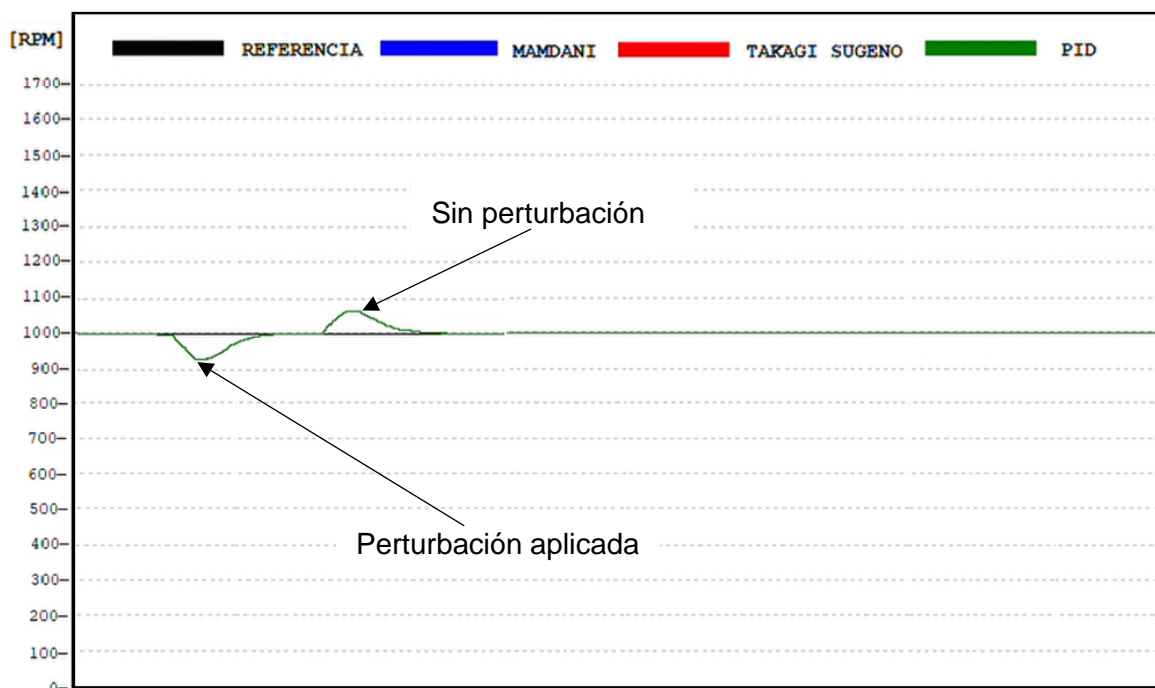
velocidad, de forma moderada, hasta llegar nuevamente a la referencia de velocidad especificada. Al eliminar la perturbación se puede observar en “Sin perturbación” que la velocidad que aumentó llega a la referencia moderadamente. Cuando la salida de la planta es compensada y se retira la perturbación mecánica se puede observar en “Sin perturbación” como el cambio de velocidad en RPM de la planta es menor respecto al cambio producido en la planta con perturbación. La respuesta del controlador difuso Takagi – Sugeno es buena y llega al estado estable sin problema con buen desempeño.

En la Figura 3.6b se observa en línea roja la acción de control del controlador Takagi – Sugeno. En el instante que ingresa la perturbación mecánica al eje del rotor, la velocidad del motor disminuye, de forma que el controlador aumenta la salida, que corresponde a la salida analógica de voltaje del PLC M580. Como se observa en el instante de “Perturbación máxima” La acción de control es suave y compensa la reducción de velocidad de forma moderada en comparación al controlador Mamdani.

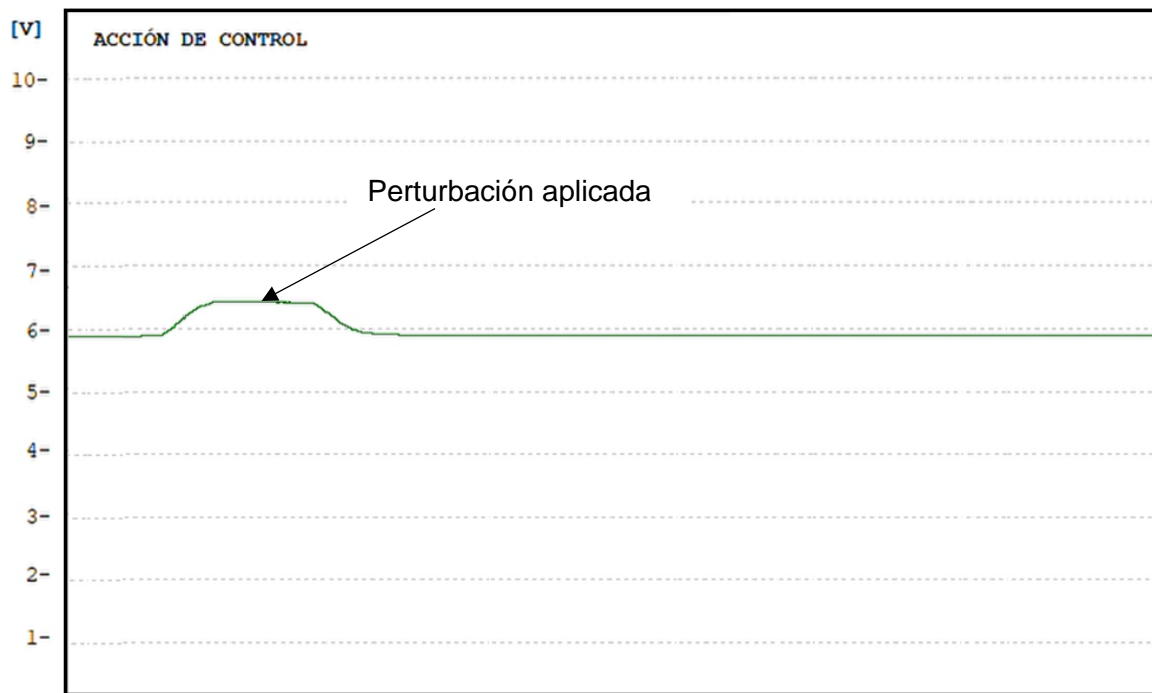
3.1.2.3 CONTROLADOR PID CON PERTURBACIÓN

3.1.2.3.1 Planta con perturbación usando controlador PID

En la Figura 3.7a se muestra cómo se comporta la salida de la planta en línea verde, usando el controlador PID, ante el ingreso y eliminación de la perturbación mecánica



(a)



(b)

Figura 3.7 a) Referencia y salida de la planta con perturbación usando controlador PID, b) Acción de Control

En la Figura 3.7a se observa que ingresa la perturbación mecánica al eje del rotor, la velocidad del motor disminuye como se observa en “Perturbación aplicada”. El controlador PID compensa la reducción de velocidad, de forma moderada, hasta llegar nuevamente a la referencia de velocidad especificada. Al eliminar la perturbación se puede observar en “Sin perturbación” que la velocidad que aumentó llega a la referencia moderadamente. Cuando la salida de la planta es compensada y se retira la perturbación mecánica se puede observar en “Sin perturbación” como el cambio de velocidad en RPM de la planta es menor respecto al cambio producido en la planta con perturbación. La respuesta del controlador PID es buena y llega al estado estable sin problema con buen desempeño.

En la Figura 3.7b se observa en línea verde la acción de control del PID. En el instante que ingresa la perturbación mecánica al eje del rotor, la velocidad del motor disminuye, de forma que el controlador PID aumenta el valor de salida, correspondiente a la salida analógica del PLC M580, como se observa en el instante de “Perturbación máxima”. La acción de control compensa la reducción de velocidad de forma brusca en comparación a los controladores difusos. Llega a eliminar la perturbación de forma rápida hasta llegar a estado estacionario.

3.1.2.4 DESEMPEÑO DE LOS CONTROLADORES

Para comprobar el desempeño cuantitativo de los controladores en la planta variador de frecuencia – motor se deben tabular los datos obtenidos. Los datos obtenidos del comportamiento de los controladores ante cambios de referencias ascendentes y cambios de referencias descendentes, y perturbación son, el tiempo de establecimiento y los índices de rendimiento ISE y IAE

Tabla 3.1 Tabulación de cambios ascendentes

CAMBIOS ASCENDENTES	Tiempo de establecimiento [s]	Índices	
		ISE	IAE
Controladores	0 – 500 [RPM]	ISE	IAE
MAMDANI	8.7	0.6744	1.8293
TAKAGI – SUGENO	8.4	0.7001	1.8705
PID	7.3	0.3929	1.1145
Controladores	500– 1400 [RPM]	ISE	IAE
MAMDANI	12.8	3.5137	5.3607
TAKAGI – SUGENO	11.5	3.4403	5.2803
PID	10.2	1.5319	2.245

Tabla 3.2 Tabulación de cambios descendentes

CAMBIOS DESCENDENTES	Tiempo de establecimiento [s]	Índices	
		ISE	IAE
Controladores	1400 – 300 [RPM]	ISE	IAE
MAMDANI	14.4	6.1568	7.8964
TAKAGI – SUGENO	13.55	5.8625	7.6327
PID	8.6	2.2956	2.7160
Controladores	300 – 0 [RPM]	ISE	IAE
MAMDANI	8.3	0.2160	0.9163
TAKAGI – SUGENO	7.9	0.1941	0.8928
PID	7.25	0.1632	0.7571

Tabla 3.3 Tabulación planta con perturbación

CAMBIOS DESCENDENTES	Tiempo de establecimiento [s]	Índices	
		ISE	IAE
Controladores	Ingreso de perturbación	ISE	IAE
MAMDANI	24.70	0.0712	0.4130
TAKAGI – SUGENO	23.25	0.0689	0.4091
PID	5.95	0.0445	0.3875
Controladores	Retiro de perturbación	ISE	IAE
MAMDANI	25.06	0.07185	0.4161
TAKAGI – SUGENO	24.32	0.0687	0.4150
PID	4.36	0.0165	0.1943

En la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se puede observar que los controladores difusos presentan el menor desempeño, teniendo los valores de los IAE e ISE más altos. El controlador difuso Takagi – Sugeno es más rápido y tiene índices mejores que el controlador Mamdani, mientras que el controlador convencional PID demostró buenos resultados, con una respuesta rápida y llegando rápidamente a la referencia.

El comportamiento de los controladores difusos ante perturbaciones es suave; el controlador de Mamdani tarda más tiempo en compensar la perturbación de velocidad, y llegar de nuevo a la referencia a diferencia del controlador Mamdani, que llega a ser moderadamente rápido. El controlado PID compensa rápidamente la perturbación del sistema, sin embargo, la acción de control es más agresiva que la acción de control de los difusos.

La Tabla 3.3 muestra los índices de desempeño, ISE e IAE, de los controladores difusos y del controlador PID ante el ingreso y retiro de la perturbación. Al ingresar la perturbación la salida del sistema disminuye ya que el mecanismo de perturbación, mencionado en 3.1.2, provocará fricción con el eje del motor. Luego de que la disminución de velocidad del sistema fue compensada por la acción de control del controlador se procede retirar la perturbación del sistema, la velocidad del motor aumenta debido a que la señal de la acción control aumentó para compensar la perturbación. El controlador disminuirá la acción de control hasta que el error tienda a cero y nuevamente la planta llegue a la referencia de velocidad especificada.

3.2 CONCLUSIONES

La lógica difusa permite el desarrollo de controladores difusos basados en diferentes mecanismos de inferencia como el de Mamdani o Takagi – Sugeno, como una alternativa de control para sistemas donde no se tiene el modelo matemático.

Se realizó el estudio del hardware del sistema y como alternativa para la medición de velocidad de la planta, variador de frecuencia – motor, se implementó el encoder incremental y el acondicionador para obtener una señal que el PLC M580 disponible puede interpretar.

La idea del diseño de estos controladores nace de no disponer del modelo matemático de la planta, por lo tanto, el funcionamiento que estos presentan permite alcanzar la referencia de manera suave, aunque tardándose más tiempo que un PID en base a la calibración que se ha realizado en este trabajo.

Se realizó la programación de los controladores difusos, basados en los mecanismos de inferencia de Mamdani y Takagi – Sugeno, en el PLC M580 mediante el software Unity Pro XL para el control de velocidad de un motor trifásico de inducción.

Mediante el software Unity Pro XL se hizo la interfaz que permite observar las variables en tiempo real e ingresar las ganancias para los controladores programados en el PLC M580.

El controlador difuso de Takagi – Sugeno tiene una respuesta más rápida ante cambios de referencia ascendentes y descendentes que el controlador difuso de Mamdani, sin embargo, la respuesta de los dos controladores difusos es más suave que la del PID.

El controlador difuso de Takagi – Sugeno tiene mejor desempeño que el controlador de Mamdani, esto se debe a los mecanismos de inferencia porque el controlador T – S para la salida usa una función polinómica de orden cero, y no funciones de membresía que requieren un algoritmo más complejo como el controlador difuso de Mamdani.

El controlador PID, sintonizado y ajustado, tiene una respuesta más rápida y agresiva ante cambios de referencia y ante el ingreso de perturbación que los controladores difusos de Mamdani y Takagi – Sugeno.

Se concluye que los controladores difusos diseñados son una buena alternativa a los controladores PID, sin embargo, requieren una calibración más exhaustiva, con lo cual se puede encontrar una respuesta que permita alcanzar la referencia rápidamente lo cual implicaría trabajar con un controlador más agresivo. En este trabajo se ha hecho un estudio inicial de la implementación de estos controladores, y los resultados mostrados responden

a una calibración de los controladores difusos que no presenten sobre impulsos a cambios de referencia.

3.3 RECOMENDACIONES

Se debe realizar el estudio del sistema para conocer el hardware necesario para su implementación.

Se recomienda buscar alternativas de medición mediante un acondicionador para el sensor, en el caso de que el PLC o controlador del sistema no pueda leer la señal de salida del sensor.

Se recomienda considerar que controlador difuso no está enfocado en remplazar los controladores convencionales, sino, busca ser una alternativa de control.

A modo de trabajo futuro se sugiere probar las librerías de control difuso en sistemas con tiempo muerto dominante en los cuales se podría evaluar nuevamente el desempeño respecto a un PID, el cual suele degradarse debido a esta característica.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O. Camacho and E. Iglesias, "Control basado en lógica difusa: De los fundamentos a las aplicaciones.," *Novasinerzia Rev. Digit. Ciencia, Ing. Y Tecnol.*, vol. 4, no. 2, pp. 6–37, 2021, doi: 10.37135/ns.01.08.01.
- [2] P. Tremante and E. Brea, "Una visión de la teoría difusa y los sistemas difusos enfocados al control difuso An overview of fuzzy theory and systems focused on fuzzy control," *Ing. Ind. Actual. y Nuevas Tendencias Año*, vol. 7, p. 12, 2014.
- [3] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*. Ohio, USA.
- [4] E. H. Mamdani, "Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers," *Int. J. Man. Mach. Stud.*, vol. 8, no. 6, pp. 669–678, 1976, doi: 10.1016/S0020-7373(76)80028-4.
- [5] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller—Part I," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 20, no. 2, pp. 404–418, 1990, doi: 10.1109/21.52551.
- [6] W. J. Chang and F. L. Hsu, "Mamdani and Takagi-Sugeno fuzzy controller design for ship fin stabilizing systems," *2015 12th Int. Conf. Fuzzy Syst. Knowl. Discov. FSKD 2015*, pp. 345–350, 2016, doi: 10.1109/FSKD.2015.7381966.
- [7] L. Antonio *et al.*, "Mejora de la respuesta dinámica de un motor de inducción trifásico

- mediante un control difuso por intervalos .,” no. December, 2012.
- [8] L. A. Mier, J. S. Benítez, R. López, J. A. Segovia, R. Peña, and F. J. Ramírez, “Adaptive Fuzzy Control System for a Squirrel Cage Induction Motor,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 5, pp. 795–805, 2017.
- [9] J. Campos, S. Jaramillo, L. Morales, O. Camacho, and D. Chavez, “PD + i Fuzzy Controller optimized by PSO applied to a variable dead time process,” *2018 IEEE 3rd Ecuador Tech. Chapters Meet. ETCM 2018*, vol. i, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/ETCM.2018.8580277.
- [10] I. Iancu, “A Mamdani Type Fuzzy Logic Controller,” *Fuzzy Log. - Control. Concepts, Theor. Appl.*, 2012, doi: 10.5772/36321.
- [11] M. Mas, M. Monserrat, J. Torrens, and E. Trillas, “A survey on fuzzy implication functions,” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 15, no. 6, pp. 1107–1121, 2007, doi: 10.1109/TFUZZ.2007.896304.
- [12] E. H. Mamdani and S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,” *Int. J. Man. Mach. Stud.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 1975, doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
- [13] H. Ying, Y. Ding, S. Li, and S. Shao, “Comparison of necessary conditions for typical Takagi-Sugeno and Mamdani fuzzy systems as universal approximators,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans.*, vol. 29, no. 5, pp. 508–514, 1999, doi: 10.1109/3468.784177.
- [14] O. Camacho and F. Rivas, *Oscar Camacho Andrés Rosales Francklin Rivas*.
- [15] O. Arrieta Orozco and V. M. Alfaro Ruíz, “Sintonización De Controladores Pi Y Pid Utilizando Los Criterios Integrales lae E Itae,” *Rev. Ing.*, vol. 13, no. 1–2, 2011, doi: 10.15517/ring.v13i1-2.618.
- [16] V. M. Alfaro Ruíz, “Estimación Del Desempeño lae Óptimo De Los Reguladores Y Servomecanismos Pid,” *Rev. Ing.*, vol. 15, no. 1–2, 2011, doi: 10.15517/ring.v15i1-2.7742.
- [17] W. Paper, “Schneider Electric Introduces First ePAC , Combines PAC with Ethernet Backbone,” 2013.
- [18] S. Electric, “Modicon M580,” 2019.
- [19] A. Drives and S. Operation, “Any Drives Series Operation Manual.”

- [20] F. De la Torre, "Motor Asíncrono o de Inducción," *Accionamientos Electromecánicos*, pp. 0–25, 2019.
- [21] A. C. Negrea, M. Imecs, I. L. Incze, A. Pop, and C. Szabo, "Error compensation methods in speed identification using incremental encoder," *EPE 2012 - Proc. 2012 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng.*, no. Epe, pp. 441–445, 2012, doi: 10.1109/ICEPE.2012.6463857.
- [22] B. Instrument and A. B. Box, "Rotary Encoder Incremental Type E50S8 (Enb)," vol. 8, pp. 8–10.
- [23] S. Alike, "Arduino Nano V2.3 User Manual," *Arduino*, pp. 1–5, 2008, [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [24] Z. W. Woo, H. Y. Chung, and J. J. Lin, "A PID type fuzzy controller with self-tuning scaling factors," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 115, no. 2, pp. 321–326, 2000, doi: 10.1016/S0165-0114(98)00159-6.
- [25] W. F. F. Marwan A. Badran, Mostafa A. Hamood, "Fuzzy Logic Based Speed Control System for Three- Phase Induction Motor," *Uem*, no. 1, pp. 17–28, 2013.
- [26] E. Akhila, N. P. Kumar, and T. B. Isha, "Fuzzy logic and PI controls in speed control of induction motor," *Adv. Intell. Syst. Comput.*, vol. 397, no. June, pp. 987–1001, 2016, doi: 10.1007/978-81-322-2671-0_93.
- [27] S. García-Nava, J. C. Ramos-Fernández, A. I. Martínez-Pérez, F. Muñoz-Palacios, and J. G. Duran-Candelaria, "Identificación y control difuso de un variador-motor de inducción trifásico," *Res. Comput. Sci.*, vol. 147, no. 7, pp. 47–58, 2018, doi: 10.13053/rcs-147-7-4.
- [28] D. Asija, "Speed control of induction motor using fuzzy-PI controller," *ICMEE 2010 - 2010 2nd Int. Conf. Mech. Electron. Eng. Proc.*, vol. 2, no. 2, pp. 115–121, 2010, doi: 10.1109/ICMEE.2010.5558463.
- [29] A. Moez, S. Mansour, C. Mohamed, and M. Driss, "Takagi-Sugeno fuzzy control of induction motor," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 68, no. May 2014, pp. 479–485, 2010.
- [30] I. D. E. J. D. E. Ardilla, E. Eibar, P. Vasco, E. España, and E. D. E. L. Motor, "Control fuzzy de la velocidad de la máquina de inducción de jaula de ardilla," pp. 3–5, 2014.
- [31] Smith and Corripio, *Control automático de procesos*, 2nd ed. Mexico: LIMUSA.

- [32] L. Wang *et al.*, "On control design and tuning for first order plus time delay plants with significant uncertainties," *Proc. Am. Control Conf.*, vol. 2015-July, no. July, pp. 5276–5281, 2015, doi: 10.1109/ACC.2015.7172163.
- [33] B. Vargas Tamani, "Efectos del retardo en el control de lazo cerrado de plantas sobreamortiguadas," *Ind. Data*, vol. 15, no. 1, p. 110, 2014, doi: 10.15381/indata.v15i1.6258.
- [34] R. M.-C. de I. Electrónica, A. y, and undefined 2011, "Evaluación del desempeño de métodos experimentales de identificación a lazo abierto," *Dialnet.Unirioja.Es*, vol. 2, pp. 1815–5928, 2011, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6724892>
- [35] O. M. Manual, "Unity Pro XLS Software," *Management*, 2008.

5 ANEXOS

5.1 ANEXO I

5.1.1 VIDEOS DESCRIPTIVOS DE LA IMPLEMENTACIÓN Y SU USO

5.2 ANEXO 2

5.2.1 CÓDIGO DEL ACONICIONADOR

5.3 ANEXO 3

5.3.1 MANUALES DE DISPOSITIVOS

5.4 ANEXO 4

5.4.1 MANUAL DE USUARIO

ANEXO I

Videos del sistema implementado y su funcionamiento

Enlace:

[VIDEOS IMPLEMENTACIÓN - JONATHAN CANDO](#)

QR:



ANEXO II

Código del acondicionador

```
#include <FreqCount.h>

int ledPin = 6;

float out_v;

float count;

int out;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  FreqCount.begin(1000);
  TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000010;
}

void loop() {
  if (FreqCount.available()) {
    unsigned long count = FreqCount.read();
    Serial.println(count);
    out_v = count/59;
    out = int(out_v);
    Serial.println(out);
    analogWrite(ledPin, out);
    if(out>255){
      out = 255;
      analogWrite(ledPin, out);
    }
    if(out<3){
      out = 0;
      analogWrite(ledPin, out);
    }
  }
}
```

ANEXO III

Manuales de dispositivo

MANUAL PLC M580 ePAC

Modicon M580

Hardware

Manual de referencia

09/2017

EIO0000001581.07

www.schneider-electric.com



CPU autónomas:

Número máximo de...	Referencia (BMEP58 ...)								
	1020(H)	2020(H)	2040(H)	3020	3040	4020	4040	5040(C)	6040(C)
canales de E/S binarias	1024	2048	2048	3072	3072	4096	4096	5120	6144
canales de E/S analógicas	256	512	512	768	768	1024	1024	1280	1536
canales expertos	36	72	72	108	108	144	144	180	216
dispositivos distribuidos ⁴ tamaño de memoria In+Out (kB)	64 2+2	128 4+4	64 2+2	128 4+4	64 2+2	128 4+4	64 2+2	64 2+2	64 2+2
módulos de comunicación Ethernet (que incluye módulos BMENOC0301/11, pero no la CPU)	2	2	2	3	3	4 ⁽¹⁾	4 ⁽¹⁾	6 ⁽¹⁾	6 ⁽¹⁾
bastidores locales (bastidor principal + bastidor ampliado)	4	4	4	8	8	8	8	8	8
estaciones RIO <i>(véase página 25)</i> (máximo de 2 bastidores por estación) (bastidor principal + bastidor ampliado)	-	-	8 ⁽²⁾	-	16 ⁽²⁾	-	16 ⁽³⁾	31 ⁽³⁾	31 ⁽³⁾
Puertos Ethernet:									
• servicio	1	1	1	1	1	1	1	1	1
• RIO o equipo distribuido	-	-	2	-	2	-	2	2	2
• equipo distribuido	2	2	-	2	-	2	-	-	-
- (no disponible)									
H (endurecido)									
C (versión con revestimiento)									
1. Sólo tres de estos módulos pueden ser módulos BMENOC0301/BMENOC0311. Todos los demás son módulos BMX Ethernet.									
2. Admite módulos adaptadores BM•CRA312•0.									
3. Admite módulos adaptadores BM•CRA312•0 y 140CRA31200.									
4. De estas conexiones: 3 están reservadas para esclavos locales; el resto está disponible para la exploración del equipo distribuido.									

CPU Hot Standby:

Número máximo de...	Referencia (BMEH58 ...)		
	2040(C)	4040(C)	6040(C)
dispositivos distribuidos	64	64	64
memoria In+Out (kB)	2+2	2+2	2+2
módulos de comunicación Ethernet (que incluye módulos BMENOC0301/11, pero no la CPU)	2	4 ⁽¹⁾	6 ⁽¹⁾
bastidores locales (bastidor principal + bastidor ampliado)	1	1	1
estaciones RIO (<i>véase página 25</i>) (máximo de 2 bastidores por estación) (bastidor principal + bastidor ampliado)	8 ⁽²⁾	16 ⁽³⁾	31 ⁽³⁾
Puertos Ethernet:			
• servicio	1	1	1
• RIO o equipo distribuido	2	2	2
• equipo distribuido	0	0	0
1. Sólo tres de estos módulos de comunicaciones pueden ser módulos BMENOC0301/BMENOC0311. 2. Admite módulos adaptadores BM•CRA312•0. 3. Admite módulos adaptadores BM•CRA312•0 y 140CRA31200.			

Configuración máxima de una estación RIO

El número máximo de canales de una estación RIO depende del módulo adaptador EIO eX80:

Adaptador EIO	Número máximo de canales			
	Binarios	Analógicos	Experto	Bus del sensor
BMXCRA31200	128	16	–	–
BMXCRA31210	1024	256	36	2
BMECRA31210	1024	256	36	2

NOTA: El número de canales disponibles puede diferir del número máximo de valores mostrados porque los valores dependen de la referencia de CPU y de los otros módulos de la misma estación. Se proporciona más información en los módulos Modicon X80 de E/S (*véase Modicon M580, Módulos RIO, Guía de instalación y configuración*). Para configurar estaciones RIO Quantum, consulte la Guía de instalación y configuración EIO Quantum (*véase Quantum EIO, Módulos de E/S remotas, Guía de instalación y configuración*).

Tamaño máximo de la memoria interna

Memoria de datos y programas (autónoma). En esta tabla se muestra la capacidad de memoria de datos y programas de las CPU autónomas M580:

Tamaño de la memoria	Referencia (BMEP58 ...)								
	1020(H)	2020(H)	2040(H)	3020	3040	4020	4040	5040(C)	6040(C)
Tamaño de memoria interna (kB)	4598	9048	9048	13558	13558	18678	18678	29174	65535 ⁽¹⁾

1. La suma de datos guardados, datos no guardados y datos de programa se limita a 65535 kB.

Memoria de datos y programas (Hot Standby). En esta tabla se muestra la capacidad de memoria de datos y programas de las CPU Hot Standby M580:

Tamaño de la memoria	Referencia (BMEH58 ...)		
	2040(C)	4040(C)	6040(C)
Tamaño de memoria interna (kB)	9462	18934	65536 ⁽¹⁾

1. La suma de datos guardados, datos no guardados y datos de programa se limita a 65536 kB.

Áreas de memoria (autónoma). En esta tabla se muestra el tamaño máximo de memoria por área de las CPU autónomas M580:

Tamaño máximo de memoria	Referencia (BMEP58 ...)								
	1020(H)	2020(H)	2040(H)	3020	3040	4020	4040	5040(C)	6040(C)
Datos guardados (kB) ⁽¹⁾	384	768	768	1024	1024	2048	2048	4096	4096
Programa (kB)	4096	8162	8162	12288	12288	16384	16384	24576	65536 ⁽²⁾

1. Se reservan 10 kB para el sistema

2. La suma de datos guardados, datos no guardados y datos de programa se limita a 65536 kB.

Descripción física de las CPUs de M580 Hot Standby

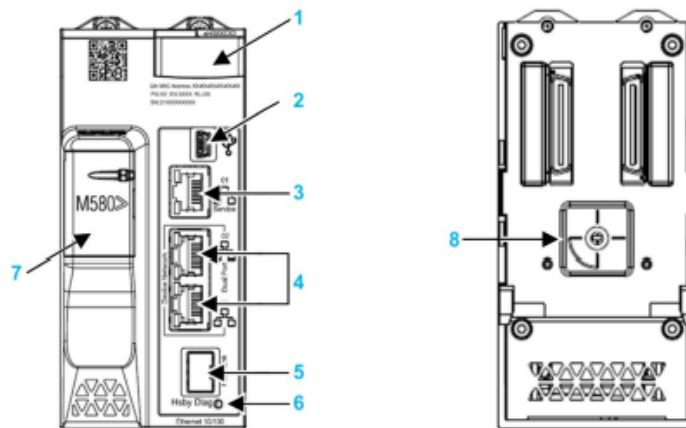
Módulos de CPU de PAC Hot Standby

Estos módulos de CPU M580 admiten sistemas M580 Hot Standby:

- BMEH582040, BMEH582040C, BMEH582040S
- BMEH584040, BMEH584040C, BMEH584040S
- BMEH586040, BMEH586040C, BMEH586040S

Vistas frontal y posterior del módulo de CPU

Los tres módulos de CPU Hot Standby tienen las mismas características de hardware externas. La parte frontal del módulo está a la izquierda. La parte posterior del módulo está a la derecha.

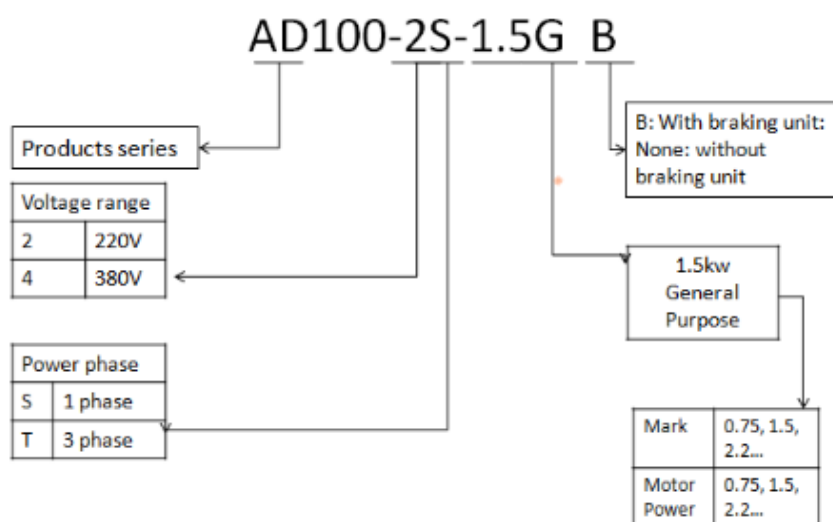


- 1 Panel de visualización de diagnóstico con LED
- 2 Puerto USB mini-B para configuración del módulo a través de un PC que ejecute Control Expert
- 3 Conector de puerto de servicio RJ45 Ethernet
- 4 Conectores RJ45 que, conjuntamente, sirven de puerto dual para la red Ethernet
- 5 Conector SFP para conexión Hot Standby de cobre o de fibra óptica
- 6 LED de conexión de estado de Hot Standby
- 7 Slot de la tarjeta de memoria SD
- 8 Conmutador rotativo de selección con posiciones A/B/borrar, que se utiliza para establecer el PAC como PAC A o PAC B, o para eliminar la aplicación Control Expert existente

NOTA: La única diferencia visible entre las CPU de seguridad y las que no son de seguridad es que las de seguridad son de color rojo.

Chapter 1. Production introduction

1.1 Model introduction

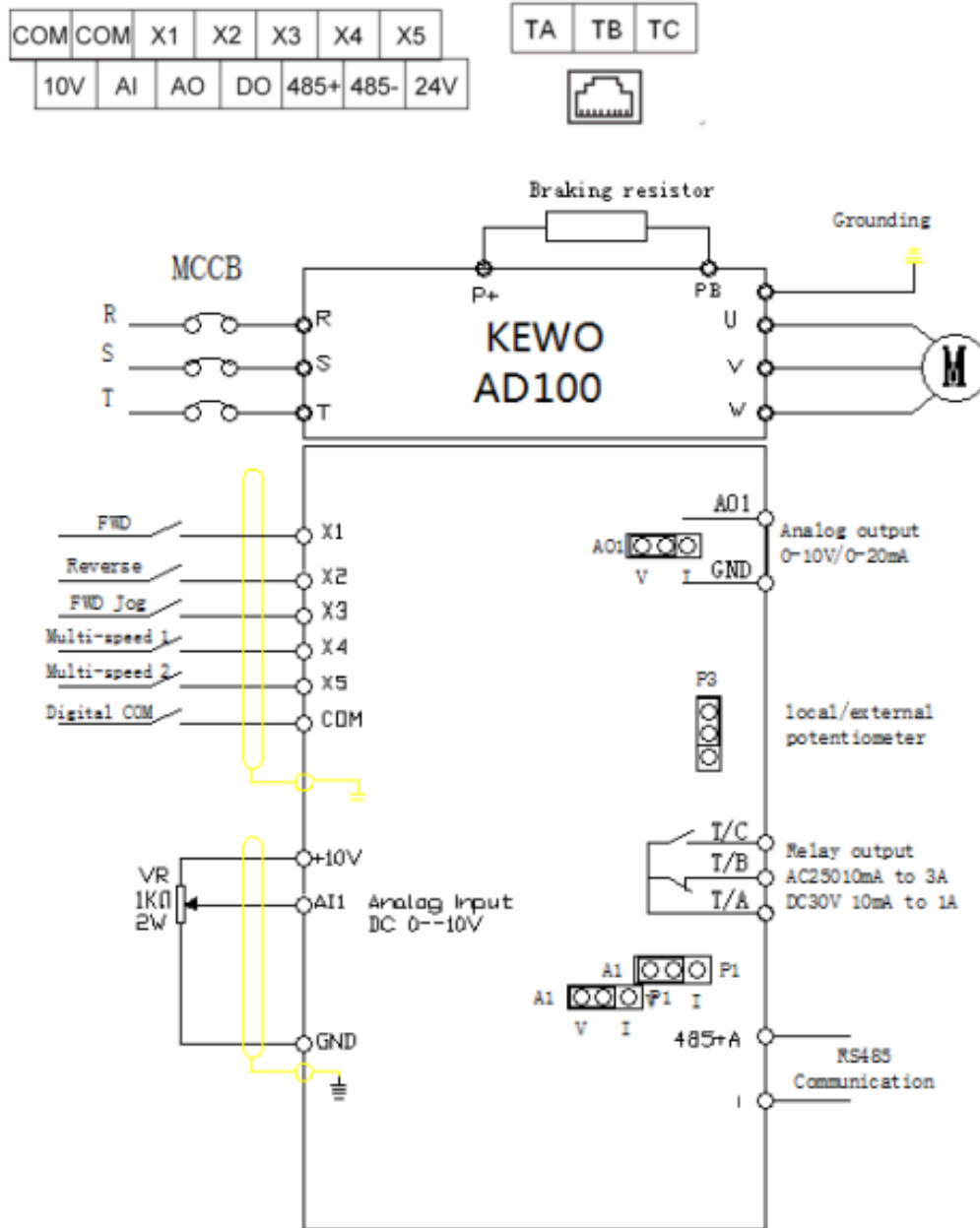


1.2 Name plate

	KEWO KEWO INVERTER
Product model →	MODEL: AD100-2S1.5G
Input specification →	INPUT: AC 1PH 220V ±15%
Output specification →	OUTPUT: AC 3PH 0~220V 0~600Hz 7A
Series No. →	NO:
	SHENZHEN KEWO ELECTRIC TECHNOLOGIES CO.,LTD

2.3. Control loop terminals and connection

2.3.1 control terminals layout and connection



2. 3.2 Control terminals function description

Terminal label	Terminal name	Function description
X1 COM	Multi-function input terminal 1	1: input specification : 24V DC , 5mA 2. Frequency range : 0 ~ 200Hz 3. Voltage range : 10V ~ 30V
X2 COM	multi-function input terminal 2	
X3 COM	multi-function input terminal 3	
X4 COM	Multi-function input terminal 4	
X5 COM	Multi-function input terminal 5 High speed pulse train input terminal	
10V COM	Supply 10V power supply	Provides 10V power supply, maximum output current:10mA, Connect potentiometer, the resistor of potentiometer is 1-5KΩ.
24V COM	24 external power supply	Provide 24V power supply, maximum current is 200mA. Use for power on sensors or small relay
AI COM	analog input terminal	1. Input voltage range : DC 0—10V 2. Input impedance : 22KΩ
AO COM	Analog output terminal	Output current or voltage signal selected by jumper P2 of controller board. Voltage signal range: 0-10V, current signal range:0-20mA
DO COM	Open controller output terminal	Multi-function single output
TA TB TC	Relay output	Multiple relay output: TA and TC is normal open, TA and TB is normal close. Specification: AC250V,3A/DC30V, 1A
485+ 485-	485 communication	Built in Rs485 connection terminals

MANUAL ENCODER

DRW171366AA

Autonics ROTARY ENCODER(INCREMENTAL TYPE) E30S4 SERIES INSTRUCTION MANUAL



Thank you for choosing our Autonics product.
Please read the following safety considerations before use.

■ Safety Considerations

※ Please observe all safety considerations for safe and proper product operation to avoid hazards.

※ ⚠ symbol represents caution due to special circumstances in which hazards may occur.

⚠ Warning Failure to follow these instructions may result in serious injury or death.

⚠ Caution Failure to follow these instructions may result in personal injury or product damage.

⚠ Warning

- Fail-safe device must be installed when using the unit with machinery that may cause serious injury or substantial economic loss.** (e.g. nuclear power control, medical equipment, ships, vehicles, railways, aircraft, combustion apparatus, safety equipment, crime/disaster prevention devices, etc.)
Failure to follow this instruction may result in fire, personal injury, or economic loss.
- Install on a device panel to use.**
Failure to follow this instruction may result in fire.
- Do not connect, repair, or inspect the unit while connected to a power source.**
Failure to follow this instruction may result in fire.
- Check 'Connections' before wiring.**
Failure to follow this instruction may result in fire.
- Do not disassemble or modify the unit.**
Failure to follow this instruction may result in fire.

⚠ Caution

- Use the unit within the rated specifications.**
Failure to follow this instruction may result in fire or product damage.
- Do not short the load.**
Failure to follow this instruction may result in product damage by fire.
- Do not use the unit in the place where flammable/explosive/corrosive gas, humidity, direct sunlight, radiant heat, vibration, impact, or salinity may be present.**
Failure to follow this instruction may result in fire or explosion.
- Do not use the unit near the place where there is the equipment which generates strong magnetic force or high frequency noise and strong alkaline, strong acidic exists.**
Failure to follow this instruction may result in product damage.

■ Ordering Information

E30S	4	3000	3	N	24	
Series	Shaft diameter	Pulses/Revolution	Output phase	Output	Power supply	Cable
Diameter Ø30mm, shaft type	Ø4mm	100, 200, 360, 500, 1000, 1024, 3000	3: A, B, Z 6: A, A̅, B, B̅, Z, Z̅	T: Totem pole output N: NPN open collector output V: Voltage output L: Line driver output	5: 5VDC ±5% 24: 12-24VDC ±5%	No mark C: Axial cable type C(※): Axial cable connector type

※ Standard : E30S4-FULSE-3-N-24 ※ Standard : A, B, Z ※ The power of Line driver is only for 5VDC ※ Cable length : 250mm

※ The above specifications are subject to change and some models may be discontinued without notice.

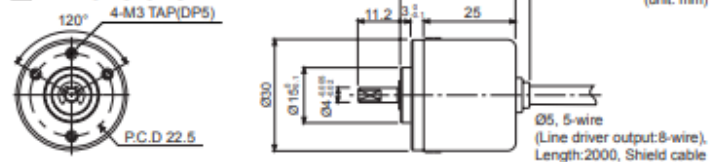
※ Be sure to follow cautions written in the instruction manual, and the technical descriptions (catalog, homepage).

■ Specifications

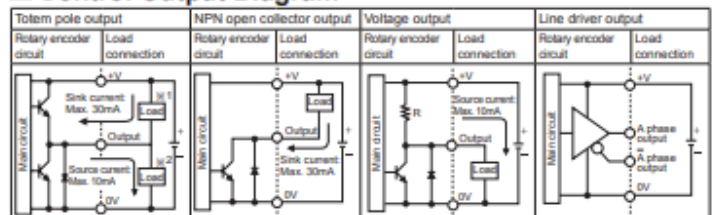
Item	Ø30mm Shaft type Incremental Rotary encoder	
Resolution(PPR)	100, 200, 360, 500, 1000, 1024, 3000 (Not indicated type is available to customize)	
Output phase	Output between A and B phase: $\frac{T}{4} \pm \frac{T}{8}$ (T=1cycle of A phase)	
Control output	Totem pole output	• Low - Load current: Max. 30mA, Residual voltage: Max. 0.4VDC= • High - Load current: Max. 10mA, Output voltage(Power voltage 5VDC=): Min. (Power voltage-2.0)VDC= Output voltage(Power voltage 12-24VDC=): Min. (Power voltage-3.0)VDC=
	NPN open collector output	Load current: Max. 30mA, Residual voltage: Max. 0.4VDC=
	Voltage output	Load current: Max. 10mA, Residual voltage: Max. 0.4VDC=
	Line driver output	• Low - Load current: Max. 20mA, Residual voltage: Max. 0.5VDC= • High - Load current: Max. -20mA, Output voltage: Min. 2.5VDC=
Response time (Rise/Fall)	Totem pole output	Max. 1µs
	NPN open collector output	Max. 1µs
	Voltage output	Max. 1µs(5VDC=; Output resistance 820Ω), Max. 2µs(12-24VDC=; Output resistance 4.7kΩ)
	Line driver output	Max. 0.5µs
Max. Response frequency	300kHz	
Power supply	5VDC ±5%, 12-24VDC ±5%	
Current consumption	Max. 80mA(disconnection of the load), Line driver output: Max. 50mA(disconnection of the load)	
Insulation resistance	Min. 100MΩ(at 500VDC)	
Dielectric strength	750VAC 50/60Hz for 1 minute(Between all terminals and case)	
Connection	Axial cable type, Axial cable connector type	
Mechanical specification	Starting torque	Max. 20gf·cm(0.002N·m)
	Moment of inertia	Max. 20g·cm ² (2×10 ⁻⁶ kg·m ²)
	Shaft loading	Radial: Max. 2kgf, Thrust: Max. 1kgf
	Max. allowable revolution ^{*)}	5000rpm
Vibration	1.5mm amplitude at frequency of 10 to 55Hz in each of X, Y, Z directions for 2 hours	
Shock	Max. 50G	
Environ-ment	Ambient temperature	-10 to 70°C(at non-freezing status), Storage: -25 to 85°C
	Ambient humidity	35 to 85%RH, Storage: 35 to 90%RH
Protection	IP50(IEC specification)	
Cable	Ø5mm, 5-wire(Line driver output:8-wire), Length:2m, Shield cable	
Accessory	Ø4mm coupling	
Approval	C(Except Line driver output)	
Weight	Approx. 80g	

※ 1: Max. allowable revolution/Max. response revolution [Max. response revolution(ppr) × $\frac{\text{Max. response frequency}}{\text{Resolution}}$ × 60 sec]
Please select the resolution to make lower max. revolution than max. allowable revolution.

■ Dimensions

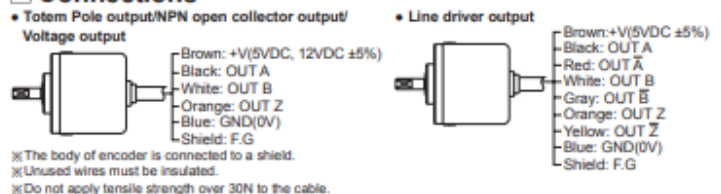


■ Control Output Diagram



- The output circuit of A, B, Z phase are the same.(Line driver output is A, A̅, B, B̅, Z, Z̅)
- Totem pole output can be used for NPN open collector type(※1) or voltage output type(※2).

■ Connections



ANEXO IV

Manual de Usuario

INDICACIONES GENERALES

- A. Para conectar el módulo para el control de velocidad del motor trifásico de inducción se recomienda en base a la siguiente figura:

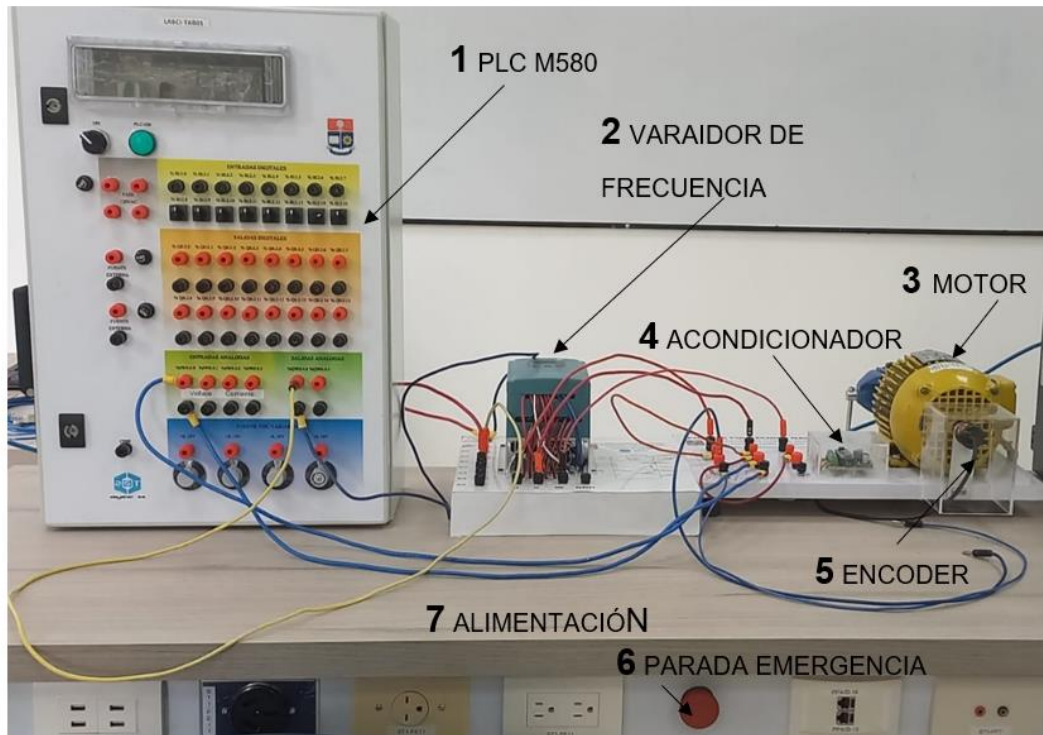


Figura 1 Conexión

- Para realizar la conexión eléctrica del sistema se recomienda primero verificar que los pulsadores de parada de encuentren activados, es decir, no hay energía en los enchufes. Como se observa en la Figura 1
- El PLC M580 debe ser conectado a una alimentación de 110 V
- Para realizar la conexión del variador, que tiene alimentación monofásica 220V, necesariamente se debe saber cuáles son los terminales para la alimentación, R y T, y los terminales de salida del variador U, V y W.
- El motor para el módulo se debe conectar en Y en el apartado de los terminales de potencia que se encuentran arriba del acondicionador.
- Para conectar la alimentación del encoder y del sensor, se debe conectar correctamente los terminales positivos y negativos a la fuente.

f) Se debe verificar las conexiones antes de desactivar el paro de emergencia.

B. Pasos de conexión alimentación del sistema

- 1) Verificar los dos pulsadores de parada activados
- 2) Conectar el PLC M580 a una alimentación monofásica de 120 V
- 3) Conectar los terminales de alimentación R y T del variador de frecuencia a una alimentación monofásica de 220
- 4) Conectar las terminales de alimentación, $\pm 24 V$, que se muestran en el tablero, en el apartado de control, a los terminales de la fuente de 24 V DC. Como se muestra en la Figura 2 parte 4
- 5) Verificar conexiones del sistema
- 6) Desactivar pulsadores de parada de emergencia.

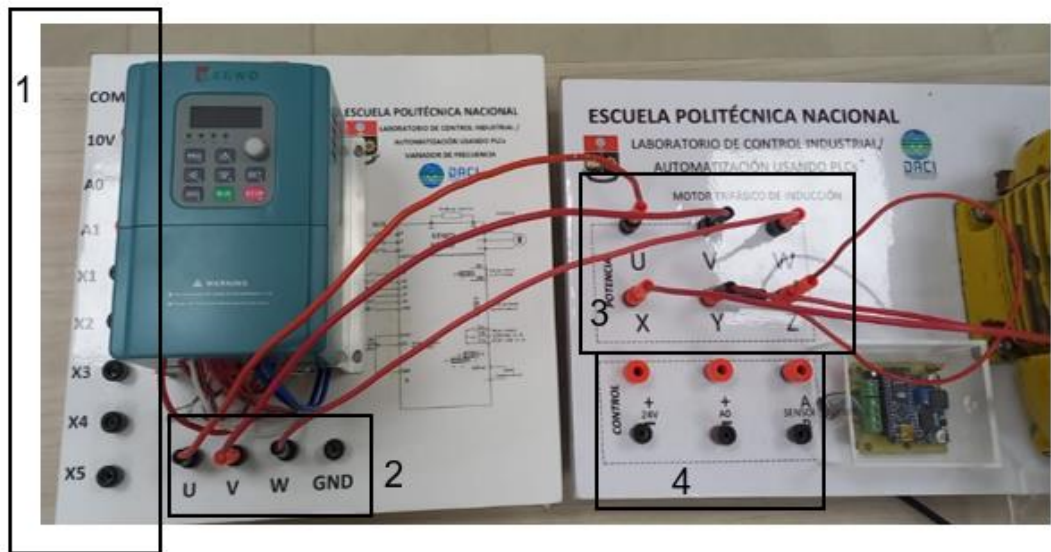


Figura 2 Conexión señales de entrada y salida de señales del sistema

C. Pasos de conexión señales de entrada y salida del PLC M580

- 1) La salida del acondicionador, que se muestra en el apartado 4, con los terminales $\pm A0$, deben ser conectados a una entrada analógica del PLC
- 2) La salida analógica del PLC, que va al variador de frecuencia, debe ser conectado a los terminales "A1", para el positivo y a "COM" para el negativo.

- Como el PLC, en este trabajo, no va a activar o desactivar el variador de frecuencia mediante una salida digital. Se conecta el terminal "X1" con "COM" para establecer que el variador funcione todo el tiempo.

D. Manejo del HMI

Para el uso de la interfaz mostrada en la Figura 3, se siguen los siguientes pasos:

- Seleccionar por medio del botón el tipo de controlador, difuso o PID, en los recuadros A1.1 y A1.2. Hay que considerar que solo puede activarse un controlador a la vez.
- Se debe especificar la referencia de velocidad en revoluciones por minuto en el cuadro A2. El botón de índices permite iniciar y encerrar, los indicadores de los índices, que se muestran en el cuadro A4 de la figura 3.
- En el cuadro A3 de la Figura 3, se muestra la velocidad y el error en revoluciones por minuto para el controlador Mamdani, en recuadros Azules, controlador T – S, en recuadros rojos y para el controlador PID se muestra en recuadros Verdes.

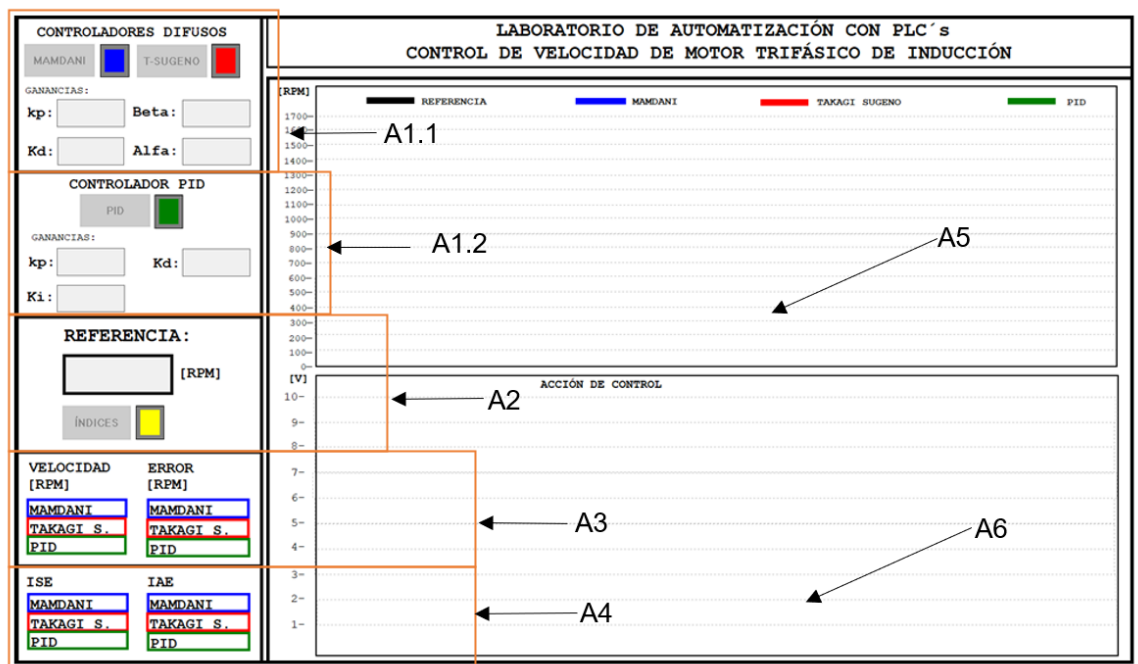


Figura 3 Interfaz de usuario

- En el recuadro A4 de la Figura 3 se observa los índices de desempeño ISE e IAE para los controladores difusos y para el controlador PID. Se debe considerar que según el controlador activado se mostrará los índices correspondientes.

- 5) En la Figura 3, A5 muestra la pantalla donde se observa la señal de referencia y la señal de salida de la planta en revoluciones por minutos.
- 6) En la Figura 4, A6 muestra la pantalla donde se observa la señal de control en voltaje.

E. Desconexión del sistema

- 1) Para apagar el variador de frecuencia, ya que el módulo no cuenta con disyuntor, se recomienda activar el pulsador de paro de emergencia de la alimentación 220V.
- 2) Se debe apagar el PLC M580
- 3) Activar el pulsador de paro de la fuente DC de 24 V