



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL
DESARROLLO.
INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO.**

**TITULO:
INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

**ESTUDIO Y DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO
IMPLEMENTADO EN UN MÓDULO BASADO EN
MICROCONTROLADORES.**

AUTORES:

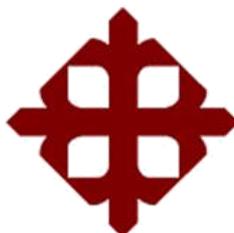
**Rodríguez Segura, Ricardo Daniel
Daza Barzola, Paúl James**

TUTOR:

Herrera Muentes, Efrén Vinicio

Guayaquil, Ecuador

2016



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA
PARA EL DESARROLLO**

INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por Paúl James Daza Barzola y Ricardo Daniel Rodríguez Segura, como requerimiento parcial para la obtención del Título de Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo.

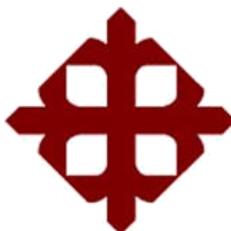
TUTOR:

Ing. Efrén Vinicio Herrera Muentes MSc.

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Miguel Armando Heras Sánchez MSc.

Guayaquil, a los 17 días del mes de marzo del año 2016



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA
PARA EL DESARROLLO**

INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Paúl James Daza Barzola

DECLARO QUE:

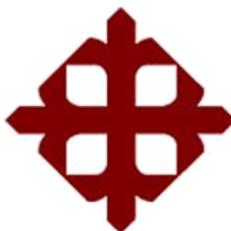
El Trabajo de Titulación **Estudio y diseño de un controlador difuso implementado en un módulo basado en microcontroladores** previa a la obtención del Título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 17 días del mes de marzo del año 2016

EL AUTOR

Paúl James Daza Barzola.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA
PARA EL DESARROLLO**

INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Ricardo Daniel Rodríguez Segura

DECLARO QUE:

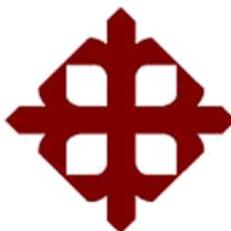
El Trabajo de Titulación **Estudio y diseño de un controlador difuso implementado en un módulo basado en microcontroladores** previa a la obtención del Título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 17 días del mes de marzo del año 2016

EL AUTOR

Ricardo Daniel Rodríguez Segura



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA
PARA EL DESARROLLO**

INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO

AUTORIZACIÓN

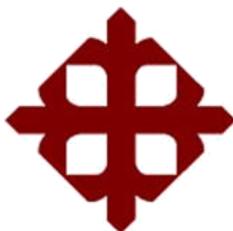
Yo, Paúl James Daza Barzola

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Estudio y diseño de un controlador difuso implementado en un módulo basado en microcontroladores** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 17 días del mes de marzo del año 2016

EL AUTOR

Paúl James Daza Barzola.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA
PARA EL DESARROLLO

INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO

AUTORIZACIÓN

Yo, **Ricardo Daniel Rodríguez Segura**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Estudio y diseño de un controlador difuso implementado en un módulo basado en microcontroladores** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 17 días del mes de marzo del año 2016

EL AUTOR

Ricardo Daniel Rodríguez Segura

Agradecimiento

Agradezco, ante todo y en primer lugar a Dios,
porque sé que Él me dio las fuerzas suficientes
para terminar mi trabajo de titulación,
a mis padres James Daza e Irma Barzola
por su apoyo confianza y amor que depositaron para lograrlo,
a mi Abuelita Marilu Murillo por ser una guía
en todos los aspectos de mi vida y
que desde el cielo me sigue guiando,
y mi compañero de tesis Ricardo Rodríguez
por el apoyo mutuo en este trabajo de titulación
a la Universidad Católica Santiago de Guayaquil
y a mis docentes Ing. Eduardo Mendoza,
Ing. Luis Córdova, Ing. Efrén Herrera
por ser mi mentores en el proceso profesional de aprendizaje y
con paciencia resolver dificultades que se presentaron.

Paul J. Daza Barzola

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación a mis Padres

James Freddy Daza Murillo

Y

Irma Isabel Barzola Zambrano

Guía fundamental en mi vida,

A mis Hermanos y sobrinos,

A mi Abuelita **Marilu Murillo**

Que desde el cielo me sigue cuidando,

A mi Novia **Suanny Cevallos**

Por su paciencia y amor invertidos en mi,

A mi eterno amigo y mascota

Mario

Que me acompaño desde la escuela hasta el momento de egresar

a titulación

Paul J. Daza Barzola

Agradecimiento

Agradezco, en primer lugar a Dios,
por ser siempre mi guía en cada paso que he dado,
por ser luz en la noche más oscura y fortalecer mi voluntad cuando me
he sentido débil.

A mis padres y abuelos,
por hacer de mí la persona que soy el día de hoy
y a mi familia por estar junto a mí en todo momento.
Gracias por creer en mí.
El centro de mi felicidad se encuentra en hacerlos sentir orgullosos.

Le debo mi reconocimiento además, a todos mis mentores
en especial a los Ing. Eduardo Mendoza Merchán, Ing. Luis Córdova
Rivadeneira y a mi tutor el Ing. Efrén Herrera Muentes.
Gracias por la paciencia y todos los conocimientos impartidos.

Por último y no menos importante le agradezco a
mi compañero de tesis y futuro colega el Sr. Paúl Daza por
superar conmigo esta prueba tan dura.

A todos ustedes mi eterna gratitud.

Ricardo D. Rodríguez Segura

Dedicatoria

Les dedico este trabajo de titulación a mis padres

Henry y Mónica

A mis hermanos

Henry y Valeria.

Y

A mis abuelitos

Fanny, Enrique y Bachita.

Los amo con todo mi corazón.

Gracias por siempre haber creído en mí.

Ricardo D. Rodríguez Segura

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE TABLAS	XXI
RESUMEN.....	XXIII
ABSTRACT.....	XXIV
CAPITULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación del proyecto.....	3
1.2. Planteamiento del problema.....	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Tipo de investigación.	6
1.5. Metodología.	6
1.6. Planteamiento de hipótesis.....	7
1.7. Delimitación del proyecto	8
CAPITULO 2.....	9
MARCO TEORICO.....	9
2.1 Estado del arte.....	9
2.2. Introducción a la lógica difusa.....	15
2.3. Lógica difusa.....	15
2.4. Sistemas de control fundamentados en lógica difusa.....	16

2.5.	Control difuso	16
2.5.1.	Elementos del control difuso.....	17
2.5.1.1.	Universo de discurso.....	17
2.5.1.2.	Conjuntos difusos.	17
2.5.1.3.	Variables, valores y reglas lingüísticas.....	18
2.5.1.4.	Funciones de membresía.....	20
2.5.1.4.1.	Función triangular.	20
2.5.1.4.2.	Función Trapezoidal.....	21
2.5.2.	Operaciones entre conjuntos difusos.....	23
2.5.2.1.	Unión.	23
2.5.2.2.	Intersección.....	23
2.5.2.3.	Complemento.....	24
2.6.	Arquitectura básica de un controlador difuso.	24
2.6.1.	Fusificación	25
2.6.2.	Bases del conocimiento.	25
2.6.2.1.	Método de Mamdani para formar reglas difusas.	26
2.6.2.2.	Método de Sugeno- Takagi para formar reglas difusas.	26
2.6.3.	Inferencia difusa.....	27
2.6.3.1.	Método de inferencia de Mamdani.....	28
2.6.4.	Defusificación	29
2.6.4.1.	Método del Centroide	30

CAPITULO 3	31
DISEÑO DEL PROYECTO.	31
3.1. Descripción general de la planta de nivel.	31
3.1.1. Modelo matemático de la planta de nivel.....	32
3.2. Diseño del controlador difuso.	33
3.2.1. Definición de variables de entrada del controlador difuso.....	33
3.2.1.1. Conjunto difuso “Error”.....	34
3.2.1.1.1. Formulas del conjunto difuso “Error”.....	35
3.2.1.2. Conjunto difuso “Derivada del error”.....	36
3.2.1.2.1. Formulas del conjunto difuso “Derivada del error”.....	37
3.2.2. Definición de variables de salida del controlador difuso.	38
3.2.2.1. Conjunto difuso “Voltaje”.	38
3.2.2.1.1. Fórmulas del conjunto difuso “Voltaje”.	39
3.2.3. Desarrollo de reglas de control.....	40
3.2.4. Defusificación de la señal de salida.....	40
3.3. Modelado del sistema en Matlab.....	41
3.3.1. Programación del controlador en Matlab.	41
3.3.1.1. Configuración de la variable de entrada “Error”.	42
3.3.1.2. Configuración de la variable de entrada “Derivada del Error”.....	44
3.3.1.3. Configuración de la variable de salida “Voltaje”.	45
3.3.1.4. Ingreso de reglas de control.....	46
3.3.1.5. Análisis de la respuesta del controlador.	48
3.3.2. Análisis de la respuesta en el tiempo del sistema con el controlador.....	49
3.3.3. Ganancias P y D del controlador.....	50
3.4. Comparación de Respuesta en el tiempo versus controlador PID.	51

CAPITULO 4	54
IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	54
4.1. Diseño electrónico del módulo de control.	54
4.1.1. Elección del microcontrolador.	54
4.1.2. Circuitos de apoyo para el microcontrolador.	56
4.1.2.1. Reguladores de 5 Voltios DC.	56
4.1.2.2. Control general de las entradas del microcontrolador.	58
4.1.2.3. Salida PWM.....	60
4.1.2.4. Puerto USB para programación del microcontrolador.	61
4.1.3. Elección de la pantalla LCD.....	61
4.1.4. Asignación de funciones a cada puerto del microcontrolador.	62
4.2. Programación del microcontrolador 18f4550.	63
4.2.1. Definir el setpoint.	64
4.2.2. Datos de entrada del sensor.	65
4.2.3. Error.....	65
4.2.3.1. Membresía para los conjuntos de Error.	66
4.2.4. Derivada del error.....	67
4.2.4.1. Membresía para los conjuntos de la Derivada del error.	68
4.2.5. Reglas y base del conocimiento.	70
4.2.5.1. Operación mínimo entre grados de pertenencia.	71
4.2.5.2. Operación máximo entre reglas.	72
4.2.5.2.1. Máximo entre reglas de Voltaje “Bajo”.	72
4.2.5.2.2. Máximo entre reglas de Voltaje “Medio”.	73
4.2.5.2.3. Máximo entre reglas de Voltaje “Alto”.	74
4.2.6. Defusificación y método del centroide.....	74

4.2.6.1.	Acción de control de los conjuntos de salida.....	75
4.2.7.	Envío de señal PWM.....	75
4.2.8.	Ganancias del sistema.	76
4.2.9.	Interfaz de la LCD.....	76
4.3.	Diseño de los diagramas PCB.....	78
4.4.	Ensamblaje del módulo.....	79
4.4.1.	Entradas y salidas del módulo.....	80
CAPITULO 5.....		82
COSTOS.....		82
5.1.	Costos de diseño e implementación del módulo.....	82
CAPITULO 6.....		84
RESULTADOS.....		84
6.1.	Respuesta del sistema en el diseño de control.	84
6.2.	Respuesta del sistema en el diseño electrónico.....	85
6.3.	Respuesta del módulo en la planta.....	85
CAPITULO 7.....		87
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		87
7.1.	Conclusiones.....	87
7.2.	Recomendaciones.....	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		90

ANEXOS	93
Anexo 1: Manual de usuario.	93
Anexo 2: Datasheet microcontrolador 18f4550.	100
Anexo 3: Datasheet LCD 4x20.	113
Anexo 4: Variador de frecuencia Sinamics G110 de Siemens.	116
Anexo 5: Diagrama de control para simulaciones matemáticas.	126
Anexo 6: Diagrama de conexiones electrónicas.	127
Anexo 7: Diseño de diagramas PCB	128
Anexo 8: Programación del módulo en lenguaje C en la plataforma Pic C.....	130
Anexo 9: Pruebas efectuadas en protoboard	142
Anexo 10: Tarjeta de control principal ensamblada.	143
Anexo 11: Ensamblaje del módulo.	143
Anexo 12: Funcionamiento del módulo en la planta.	144

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 2

Figura 2.1: Estructura básica de un controlador difuso en lazo de control cerrado. ...	16
Figura 2.2: Asignación de valor de membresía según la lógica usada.....	18
Figura 2.3: Tipos de función de membresía usadas en el diseño de un controlador..	20
Figura 2.4: Función de membresía triangular y sus parámetros de diseño.	21
Figura 2.5: Función de membresía trapezoidal y sus puntos de referencia más importantes.	21
Figura 2.6: Función trapezoidal abierta hacia la izquierda.	22
Figura 2.7: Función trapezoidal abierta hacia la derecha.....	22
Figura 2.8. Representación grafica de la operación unión entre dos conjuntos difusos.	23
Figura 2.9: Representación gráfica de la operación intersección entre conjuntos difusos.	24
Figura 2.10: Estructura detallada de un controlador difuso.	24
Figura 2.11: Ejemplos de variables de entradas fusificadas de un sistema con diferente cantidad de etiquetas.	25
Figura 2.12: Explicación del método de Mamdani visto desde un punto de vista gráfico.....	29
Figura 2.13: Representación gráfica de varios métodos de defusificación.....	29
Figura 2.14: Conceptualización gráfica del centro de área.	30

CAPITULO 3

Figura 3.1: Planta de nivel seleccionada para las pruebas del controlador difuso.	31
Figura 3.2: Respuesta en lazo cerrado de la función de transferencia de la planta. ...	32

Figura 3.3: Esquema estructural del diseño del controlador.....	33
Figura 3.4: Diagrama de bloques del sistema general.....	34
Figura 3.5: Funciones de membresía del conjunto difuso “Error” expresadas gráficamente.	35
Figura 3.6: Funciones de membresía del conjunto difuso “Derivada del error” expresadas gráficamente.....	37
Figura 3.7: Funciones de membresía del conjunto difuso “Voltaje” expresadas gráficamente.	39
Figura 3.8: Diagrama de bloques del sistema con sus entradas.	41
Figura 3.9: Ventana de trabajo de FIS Editor.	42
Figura 3.10: Ventana de configuración de la funciones de membresía.	43
Figura 3.11: Funciones de membresía de la variable “Error” configuradas.	44
Figura 3.12: Funciones de membresía de la variable “Derivada del Error” configuradas.	45
Figura 3.13: Funciones de membresía de la variable de salida “Voltaje”.	46
Figura 3.14: Ventana del Rule Editor.	47
Figura 3.15: Base del conocimiento del controlador difuso.	47
Figura 3.16: Representación numérica de la respuesta del controlador.....	48
Figura 3.17: Representación gráfica de la respuesta del controlador.	48
Figura 3.18: Respuesta de la planta con controlador vs la planta sin controlador.	50
Figura 3.19: Cambios estructurales del diseño del controlador.....	50
Figura 3.20: Comparación de la respuesta del sistema con y sin ganancias.....	51
Figura 3.21: Comparación de la respuesta del sistema con controlador PID vs Difuso.	52
Figura 3.22: Comparación de esfuerzo de control realizada por el controlador PID vs Difuso.	52

CAPITULO 4

Figura 4.1: Diagrama de pines del microcontrolador 18f4550.	55
Figura 4.2: Circuito regulador de 12V DC a 5 V DC con 3A de corriente.....	57
Figura 4.3: Circuito reductor de voltaje para el sensor de entrada.....	58
Figura 4.4: Circuito de conexión de los botones y sus pines acción.....	59
Figura 4.5: Circuito de conexión de los potenciómetros y sus pines de acción.....	59
Figura 4.6: Circuito para aislamiento y envío de la señal PWM emitida por el microcontrolador.	60
Figura 4.7: Circuito enviar señal PWM.	60
Figura 4.8 Esquema de conexiones del puerto USB tipo B.	61
Figura 4.9: Conexión de la pantalla LCD con el microcontrolador.	62
Figura 4.10: Diagrama de flujo básico del funcionamiento del controlador difuso...	64
Figura 4.11: Diagrama de flujo del setpoint.....	64
Figura 4.12: Diagrama de flujo de los datos recibidos por el setpoint.....	65
Figura 4.13: Diagrama de flujo del error.	66
Figura 4.14: Diagrama de flujo de los casos del error.	67
Figura 4.15: Diagrama de flujo para obtener la derivada del error.....	68
Figura 4.16: Diagrama de flujo de los casos de la derivada del error.....	69
Figura 4.17: Diagrama de proceso de evaluación de funciones de membresía de cada regla.	70
Figura 4.18: Diagrama de proceso de evaluación de los consecuentes de cada regla.....	71
Figura 4.19: Diagrama de flujo para determinar el mínimo de cada regla.	72
Figura 4.20: Diagrama de flujo del valor de membresía del conjunto Voltaje “Bajo”.....	73
Figura 4.21: Diagrama del valor de membresía del conjunto Voltaje “Medio”.	73

Figura 4.22: Diagrama del valor de membresía del conjunto Voltaje “Medio”.	74
Figura 4.23: Diagrama de la estructura para defusificar la salida.....	74
Figura 4.24: Interfaz inicial con los datos de los autores.....	77
Figura 4.25: Interfaz principal con los datos del sistema.....	77
Figura 4.26: Interfaz secundaria con los grados de membresía de cada conjunto.	77
Figura 4.27: Diagrama PCB de tarjeta principal.....	78
Figura 4.28: Diagrama PCB de los botones del módulo.....	79
Figura 4.29: Módulo de control durante el ensamblaje.....	80
Figura 4.30: Entradas y salidas físicas del módulo de control.....	81

CAPITULO 6

Figura 6.1: Comparación de la respuesta del sistema con controlador vs sin controlador.....	84
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO 2

Tabla 2.1: Definición matemática de los cuatro métodos de inferencia más utilizados.	27
---	----

CAPITULO 3

Tabla 3.1: Funciones de membresía del conjunto difuso “Error”.....	36
Tabla 3.2: Funciones de membresía para el conjunto difuso “Derivada del Error”. .	37
Tabla 3.3: Funciones de membresía del conjunto difuso de salida “Voltaje”	39
Tabla 3.4: Matriz de reglas de control de la base de datos de Inferencia.	40
Tabla 3.5: Ganancias del controlador difuso.....	51

CAPITULO 4

Tabla 4.1: Casos programados de los conjuntos de Error con sus funciones.	66
Tabla 4.2: Casos programados de los conjuntos de Derivada del error con sus funciones.	69
Tabla 4.3: Funciones de la variable Voltaje invertidas.....	75
Tabla 4.4: Asignación de las tareas de los puertos de entrada y salida del módulo...	81

CAPITULO 5

Tabla 5.1: Lista de costos del proyecto.....	83
--	----

CAPITULO 6

Tabla 6.1: Parámetros de control de la planta con y sin controlador.	84
Tabla 6.2: Respuesta del sistema respecto al error en Proteus.....	85

Tabla 6.3: Respuesta del sistema respecto al error en la práctica.	86
Tabla 6.4: Contraste de la respuesta entre simulación y realidad de la salida del módulo.....	86

RESUMEN

El presente trabajo de titulación explica minuciosamente el desarrollo del estudio y diseño de un módulo de control difuso basado en microcontroladores que tiene por finalidad controlar diferentes clases de procesos.

La construcción del mismo es realizada con elementos de electrónica convencional y un microcontrolador con el propósito de presentar a los estudiantes y docentes de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil una alternativa viable de implementación de un controlador que reemplaza eficientemente a un PLC.

Se diseña, previa a su construcción, la base del conocimiento del módulo por medio de la asignación de reglas de control elaboradas con lógica difusa. El punto de partida para estas es el control del nivel de agua de un tanque a través del manejo de una bomba con el fin de optimizar el trabajo de la misma. Se realiza el contraste de los valores obtenidos en las simulaciones electrónicas versus los registrados en la práctica para corroborar su funcionamiento correcto y luego se compara su tiempo de respuesta versus un PID realizado por un ex estudiante de la facultad.

Se evidencia al final del proceso realizado que el controlador diseñado supera los resultados producidos por el controlador PID, además al verificar los resultados de las prácticas en el computador versus las reales se obtiene que una variación de 0.32V con respecto a la ideal. Se registra en los anexos un manual de uso del módulo de control para guiar a los usuarios de este en el proceso de reprogramación y control de nuevas variables.

ABSTRACT

This paper explains carefully the development of the study and design of a fuzzy control module based on the use of microcontrollers which are intended to control different kinds of processes.

The construction of these is made with common electronic elements and a microcontroller in order to present to Universidad Católica de Santiago de Guayaquil's students and teachers an efficient alternative implementation of a controller instead of a PLC.

Before its construction, the knowledge bases were designed by the assignation of fuzzy logic control rules. The starting point for these rules was the management of the water level of a tank through the control of the water pump's working frequency to aim optimization. In order to confirm the module's correct operation a contrast between the electronic and practical values was made, its response time is compare too against a PID controller made by a former student.

In the end of the process is easy to see the superiority of the fuzzy logic controller response compare to PID's. Also, the difference between the real values and the simulate values is less than 0.32V from the ideal response. A user's manual is attached at the end of the document in the annex chapter with the intention of guide the future users in the course of the new variable reprogramming process.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del ser humano en todo ámbito se mueve a pasos agigantados, casi todos los días en los medios de comunicación se puede observar como los avances tecnológicos y nuevos descubrimientos se van fusionando en todas las áreas relacionadas al desarrollo. La industria en general es una de las ramas que más transformaciones sufre debido al deseo de los productores de aumentar la calidad y cantidad de producto ofertada y reducir costos.

Es ahí donde ejercen su función los ingenieros al tratar de cumplir las metas de producción de las empresas mediante la automatización y control independiente de sus procesos. Realizar estas mejoras en una industria puede potenciar en todo aspecto la fabricación de bienes y aumentar las ventas debido a la posibilidad de programar grandes lotes de producción.

Automatizar una planta industrial suele ser una tarea engorrosa de realizar con los métodos de ejecución tradicionales pero, gracias a los avances tecnológicos, es posible llevarla a cabo con la ayuda de una amplia variedad de equipos cuya programación es de fácil diseño; sin embargo, implementar el control de las variables de un proceso para mantenerlas óptimas suele ser un poco más compleja.

La finalidad del control de un proceso o actividad industrial es mejorar el desempeño y reducir al mínimo el esfuerzo de una planta por alcanzar un punto ingresado por el usuario. Su importancia radica en que si se disminuye el esfuerzo de la planta, se acortarán de forma proporcional los recursos gastados innecesariamente.

A primera instancia, utilizar los métodos de control clásicos como el PID puede ser útil cuando se desee manejar plantas cuyo entorno sea simple; pero a medida que un proceso aumenta su rango de acción, sumando variables de entrada y de salida, aumenta también su complejidad y con esto se ven reducidas las posibilidades de usar un controlador convencional. Una forma de enfrentar este tipo de inconvenientes es mediante el uso de controles modernos como el controlador difuso

cuyo alcance solo se ve limitado por la experiencia del operador utilizada para crear ciertas direcciones de control.

Conocer estas herramientas asegura el éxito a los futuros profesionales ya que les permitirá enfrentar cualquier obstáculo sin dudas. Desafortunadamente en las instalaciones de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil no es posible encontrar ningún módulo industrial cuyas características de control se centren en algún método distinto al clásico lo cual limita el conocimiento de los estudiantes.

La finalidad de este proyecto es entregar un módulo cuyo controlador se centre en el uso de la lógica difusa y permita, tanto a docentes como estudiantes, aumentar su conocimiento en el campo del control industrial. Para el desarrollo del mismo se hará uso de una planta de nivel donada por un ex estudiante de la carrera cuyo controlador actual es un PID.

En esta tesis se describe el proceso llevado a cabo para diseñar y construir un equipo, basado en microcontroladores, capaz de manejar distintas variables industriales haciendo uso de un controlador difuso. Se describen además los resultados obtenidos al evaluar el desempeño del mismo versus un controlador PID contrastando su tiempo de respuesta, estabilidad y porcentaje de overshoot. Se espera que de esta forma, los futuros beneficiarios de este módulo puedan conocer todas las ventajas de implementación que posee la lógica difusa.

Como futuros ingenieros innovar es uno de los principales objetivos y realizar un estudio acerca de este tipo de control en una planta ofrece una excelente oportunidad para poner en práctica todas las habilidades aprendidas a lo largo de la carrera.

1.1. Justificación del proyecto

La principal razón de desarrollo de este proyecto es la falta de módulos en los que se pueda conocer el funcionamiento de controladores no convencionales como el difuso en los laboratorios de control y automatismo de la Facultad Técnica para el Desarrollo.

Entender este tipo de controladores es de suma importancia para los estudiantes de control y automatismo ya que los mismos son una excelente respuesta ante inconvenientes que se presenten durante la implementación de un controlador no convencional. Su lógica y base matemática sencilla hacen de estos controladores una opción importante a tomar en cuenta a la hora de automatizar procesos de todo tipo.

Al estudiar su mecanismo de acción en una planta de nivel les dará una pauta inicial de sus innumerables formas y procesos donde puede ser aplicado. Esto sin mencionar el bajo costo que posee el módulo al ser desarrollado en base a microcontroladores. Se tiende a creer que los microcontroladores no han sido diseñados para trabajar en ambientes industriales donde usualmente se usan equipos como el PLC cuando la realidad refleja todo lo contrario. Conocer otra propuesta, además del uso de los caros equipos industriales programables, incrementa el campo de acción del profesional abarcando a posibles consumidores con menos capital.

En el mundo laboral los ingenieros están expuestos a solucionar problemas de todo tipo y poseer la mayor cantidad de herramientas útiles asegura los pasos seguros en el camino del éxito. De no realizarse este proyecto los estudiantes enfrentarían ciertos obstáculos con un conocimiento limitado en el vasto campo del control industrial y la electrónica.

1.2.Planteamiento del problema

Durante el desarrollo de los estudiantes de Ingeniería Electrónica en Control Y Automatismo es esencial lograr fusionar la parte cognoscitiva con la práctica para conseguir llegar al conocimiento pleno de esta carrera. Alcanzar este punto ideal asegura el progreso idóneo de los futuros ingenieros ya que les proporcionaría la oportunidad de relacionarse con todas las herramientas disponibles en su haber. Una de las maneras de lograr este objetivo es mediante el control automático de un proceso industrial o el manejo de una variable en una planta.

En los laboratorios de electrónica, control y automatismo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil se pueden encontrar diversos tipos de módulos de control de procesos manejados a través de Controladores Lógicos Programables (PLC) cuyo diseño se basa en el uso de un controlador PID. Estudiar este tipo de control clásico es ideal para entender, en primera instancia, el funcionamiento de un controlador e iniciar así el camino en el estudio de los procesos. Este tipo de controlador es utilizado de forma muy habitual ya que ayuda a solucionar problemas de optimización en muchas situaciones por lo que puede ser considerada una excelente herramienta de trabajo.

Sin embargo, se puede observar a simple vista los pasos agigantados en los que avanza la automatización y el deseo de los productores de realizar procesos cada vez más complejos, en los que se administren recursos de forma más eficiente involucrando menor uso de equipos. Si bien es cierto, un controlado PID puede ayudar a solucionar este inconveniente pero su diseño e implementación se dificulta cuando la planta involucra un proceso cuyo análisis matemático puede ser difícilmente modelado; esto sin mencionar el bajo alcance que posea el control clásico cuando se trata de un proceso donde se involucran varias entradas y salidas.

Para estos casos donde se involucran procesos más complejos o las bases matemáticas son de difícil estudio es importante conocer otras formas de control. Estar al tanto de formas de control en las que estas características de un proceso puedan ser involucradas fácilmente es esencial dentro de las herramientas de un

ingeniero electrónico en control y automatismo ya que ofrecerán una solución en estos casos que será igual de eficiente que el control clásico.

Infortunadamente, como ya se mencionó antes, en los laboratorios de la Facultad Técnica para el Desarrollo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil no se encuentra a disposición ningún módulo de este tipo en el que, tanto profesores como alumnos, puedan estudiarlo.

Elaborar un módulo de control difuso brindará a los estudiantes de ingeniería electrónica en control y automatismo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil la oportunidad de conocer el funcionamiento de un controlador moderno y evidenciar que su respuesta en el tiempo es tan estable como la de un controlador clásico destacándose con varias ventajas en su implementación.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar el diseño de un controlador difuso implementado en un módulo basado en microcontroladores para ser usado por los estudiantes de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo en el estudio de control de procesos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar un módulo didáctico con lógica difusa en el que se puedan realizar pruebas de control con variables de entrada y salida que el usuario programe.
- Efectuar la construcción del controlador diseñado mediante el uso de elementos electrónicos convencionales como una alternativa de implementación respecto al PLC.
- Demostrar el funcionamiento del controlador difuso en una planta de nivel en la que se optimice el trabajo de una bomba para controlar dicha variable en un tanque.
- Comparar los resultados electrónicos obtenidos en las simulaciones realizadas versus los conseguidos en la práctica para garantizar cohesión en el funcionamiento del controlador

- Contrastar el comportamiento del controlador difuso versus el de un controlador PID en el manejo de la planta seleccionada evaluando sus respuestas en el tiempo.
- Elaborar un manual de usuario donde se detalle el uso adecuado del controlador y pasos a seguir para reprogramar su función.

1.4.Tipo de investigación.

El tipo de investigación a realizarse en esta tesis es descriptiva- explicativa. Queda determinada esta clase de tesis ya que los autores consideran que será la forma más adecuada de llegar a los usuarios del módulo. En sus capítulos se detalla el proceso seguido para alcanzar los objetivos trazados y se busca que, al finalizar el proceso de desarrollo del proyecto, el lector comprenda los por menores de cada paso que se dio para elaborar el módulo de control.

1.5.Metodología.

La metodología a utilizar será de tipo investigativa y secuencial. Se detallará el proceso realizado durante el desarrollo del controlador. Para el diseño del controlador difuso se hará uso de la plataforma Matlab en la que es posible realizar simulaciones acercadas a la realidad. Al ser un controlador difuso no será difícil plantear las variables o puntos de referencia que este usará ya que solo basta con la experiencia previa de un operador.

La implementación del proyecto es elaborada en Proteus, un simulador electrónico que ayuda a realizar pruebas con dispositivos programables como los microcontroladores. El lenguaje C es el utilizado para determinar el comportamiento del sistema propuesto.

El último paso será la comprobación de los datos planteados versus los obtenidos y se contrastará el desempeño del controlador difuso con la respuesta en el tiempo de la planta manejada por un controlador PID. El lector podrá observar los datos de ambas pruebas en tablas y gráficos de diversos tipos que facilitarán su apreciación.

La finalidad de esto es asegurar el entendimiento total del usuario acerca de las conclusiones obtenidas.

1.6.Planteamiento de hipótesis

Dando un vistazo rápido a los avances tecnológicos ocurridos en la industria podemos observar que mejorar la producción mediante la automatización de un proceso es una situación común que enfrenta un ingeniero electrónico en control y automatismo. Los inconvenientes por diseño a la hora de implementar un controlador clásico son frecuentes y pueden complicar la entrega de un proyecto. Saber cómo enfrentar estos obstáculos en el campo laboral y superarlos a tiempo es la firma de un ingeniero exitoso.

Para evitar lo mencionado en los alumnos de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil se plantea la siguiente hipótesis: “Conocer otros tipos de control además del controlador convencional PID es útil para solucionar problemas de diseño e implementación en distintos procesos industriales.”

El módulo que se desarrollará en este trabajo de titulación pretende ofrecer a los estudiantes la oportunidad de conocer una opción fiable que reemplaza el uso de los controladores clásicos manteniendo su eficiencia y reduciendo su tiempo y costos de implementación. Los controladores difusos poseen ciertas ventajas frente a las formas de control convencional y en esta tesis se realizará una comparación que lo demuestre.

La finalidad de este proyecto será entregar a los estudiantes un equipo donde puedan observar el funcionamiento de un controlador difuso y se familiaricen con la forma de trabajo del mismo. Se espera que su uso, llevado de la mano de una buena base teórica dictada por los docentes, les desarrolle una herramienta más con la cual poder enfrentar las complicaciones de implementación de un controlador en un proceso.

1.7. Delimitación del proyecto

El presente trabajo de graduación pretende presentar a los estudiantes de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo un módulo de control didáctico elaborado con lógica difusa que será gobernado por un microcontrolador 18f4550 para regular el nivel de líquido de un tanque en una planta que se encuentra en el laboratorio de automatismo. El usuario ingresará el setpoint deseado para la planta el cual podrá verificar en una pantalla LCD 4x20. El controlador, a su vez, realizará la acción de control y devolverá el estado actual del nivel del tanque en el mismo dispositivo visual hasta alcanzar el nivel deseado, punto en el que se mantendrá estable.

En este documento se explica también con detalle los pasos seguidos en la elaboración de dicho módulo para que puedan ser estudiados con mayor facilidad y sean tomados como pauta en la realización de futuros equipos con la misma finalidad de control. Además del escrito antes mencionado se anexa un manual que facilitará a los docentes y estudiantes la forma de manejo adecuado del equipo para no incurrir en daños para el mismo.

El proceso será simulado matemáticamente en una plataforma de trabajo llamada Matlab que nos ayudará a estimar el comportamiento de las funciones de membresía a ser utilizadas en el controlador. *Matlab* también cuenta con una herramienta muy útil llamada *Simulink* que brindará la oportunidad de elaborar el diagrama de bloques del sistema y conocer la respuesta en el tiempo del mismo ante la acción de control ejercida por el bloque difuso. La programación utilizada en el microcontrolador será realizada en lenguaje C y simulada, junto a los demás componentes electrónicos en *Proteus*. Esto se puede evidenciar en el diagrama eléctrico adjuntado al trabajo de tesis.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1 Estado del arte.

Tema 1

Implementación de control de velocidad de un motor DC con controlador PID convencional y fuzzy P-PI-PID con diferentes tipos de entradas utilizando software LabView

El presente informe profesional propone, en su desarrollo, la elaboración de un control PID y uno de lógica difusa con los equipos de National Instruments adquiridos por la Universidad Técnica de Babahoyo mediante el uso de la plataforma LabView para enriquecer el conocimiento práctico y teórico de los estudiantes de Ingeniería en Sistemas e Ingeniería Eléctrica. La variable a controlar es la velocidad de giro de un motor DC cuyo objetivo es demostrar a los estudiantes el propósito de un controlador PID y de lógica difusa P-PI-PID y enlistar ventajas y limitaciones de aplicación de uno frente a otro. Se pueden observar en su contenido las respuestas en estado estacionario para cada caso del controlador P, PI, PID y difuso P-PI-PID con el porcentaje de error para todos los eventos. Se concluye que el controlador difuso es superior al controlador PID debido a sus respuestas presentadas y facilidad de implementación. Sin embargo, se determina también que para garantizar el éxito del controlador fuzzy es necesario haber tenido una experiencia previa con el sistema a tratar lo cual es una desventaja frente al PID que solo necesita su modelo matemático. (Agama, 2015)

Tema 2

Diseño y construcción de un control difuso de lazo cerrado de temperatura mediante el microcontrolador 18f452 para los laboratorios de teoría de control de la Universidad Politécnica Salesiana.

El trabajo de titulación citado tiene como finalidad desarrollar las etapas para diseñar un controlador difuso capaz de manejar la temperatura de una cámara calefactora desde 50°C hasta 100°C e implementarlo a través de un microcontrolador con el objetivo de entregar un módulo útil en el estudio de la teoría de control. El control difuso diseñado consta de dos entradas con las que se pone en marcha un algoritmo encargado de llevar a cabo la fusificación, aplicación de las reglas difusas y defusificación para realizar una acción con la salida de control que actúa sobre la planta modelada. Detalla además el procedimiento a seguir para elaborar una HMI a través del software LabView en la que se pueda observar los resultados de la implementación y experimentación realizada por el usuario en el módulo. (Dávila, 2013)

Tema 3

Diseño e implementación de un control difuso tolerante a falla, aplicado al control de nivel de un líquido.

El trabajo de investigación mencionado expone el diseño de un controlador difuso para el control de una planta de nivel mediante la plataforma LabView. Entre los rasgos más destacados del diseño se recalca su tolerancia a un porcentaje de falla del sistema. Se persigue en este proyecto la comparación entre un controlador clásico PI y un controlador difuso moderno elaborado mediante la técnica *gain scheduling* para puntualizar diferencias entre estos mediante la experimentación. Se elabora el módulo de tal forma que el mismo pueda funcionar de manera virtual o física obteniendo similares resultados en la experimentación. En la parte física se utiliza el sistema *MPS SA Compact Workstation* de la Universidad Politécnica Salesiana que ayuda a simular la planta de nivel junto a un caudalímetro que ayudará a medir y regular el flujo del modelo. En la parte virtual se utiliza la plataforma LabView para

interpretar la planta estudiada a la cual se agrega un filtro de *Savitzky-Golay* que ayuda a obtener la primera derivada del volumen necesaria para hallar la relación con el nivel del líquido. La investigación tiene el objetivo de medir el rendimiento entre un controlador clásico y uno moderno actuando sobre la misma planta (Criollo, 2015).

Tema 4

Diseño de controladores PID difusos de las variables de nivel y temperatura de una plataforma de entrenamiento para control de procesos continuos.

El objetivo de la tesis mencionada es dar a los docentes y estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana de Quito Campus Sur la oportunidad de poder adentrarse en el estudio del control moderno mediante la elaboración de un módulo de experimentación PID difuso para controlar nivel y temperatura de forma similar como la encontrada en un proceso industrial. Se trata de englobar conocimientos básicos de la malla de estudios de la carrera Ingeniería Electrónica como: Teoría de Control, Instrumentación, Automatización Industrial e Informática Industrial para que así el estudiante pueda reconocer la importancia de estos campos y logre entender como todas estas materias se pueden relacionar en un solo proyecto de estudio. Se compara además la respuesta de las pruebas matemáticas realizadas en Matlab con las físicas programadas en un PLC Siemens S7-1200 el cual es de uso muy común en la industria. (Sanchez & Barrera, 2015)

Tema 5

Control difuso adaptativo para un mecanismo no lineal de helicóptero.

El presente artículo científico desarrolla el análisis de control por modelo de referencia. Este método generalmente es usado para sistemas no lineales como el helicóptero a escala tomado como caso de estudio. Se plantea entonces diseñar un controlador difuso PD al que se le agregaría además un sistema adaptativo que modifique la posición de los centros de las funciones de membresía con el fin de lograr reducir el error a cero. Asimismo, se añade al diseño una etapa integradora del

error que es sumada a la respuesta del controlador para disminuir la diferencia entre el setpoint y la respuesta de la planta (Ortiz, 2013).

Tema 6

Diseño de un sistema de control lógico difuso basado en microcontroladores de 8 bits.

En este documento los autores presentan el desarrollo de la elaboración de un controlador difuso capaz de adaptarse a cualquier sistema mediante ciertas modificaciones hechas por el usuario. Su funcionamiento se basa en el uso de microcontroladores que realizan las inferencias y ejercen la acción de control sobre la planta. Se programa el microcontrolador con la capacidad de manejar hasta 4 entradas analógicas y controlar 3 salidas. Adicional se diseña el módulo con la habilidad de ser conectado a la computadora para así poder realizar modificaciones de forma más exacta evaluando la respuesta del sistema en el tiempo. Para probar su funcionamiento se evalúa la respuesta del controlador en una planta de control de nivel de un tanque. Se determina como conclusión principal la importancia de conocer la planta con la finalidad de reducir costos por implementación con etapas innecesarias de control (Ramírez, Lázaro, & Anzurez, 2008).

Tema 7

Análisis y comparación de sistemas de control PID y PID difuso en lógica reconfigurable.

En este trabajo de titulación se evalúa el rendimiento del controlador PID frente al control PID difuso en el manejo de una planta compuesta por motores DC. Su diseño se establece en el uso de lógica reconfigurable y se proponen distintos modelos de control PID difuso implementados en una tarjeta FPGA de distinto tipo. Las comparaciones que se realizan están fundamentadas en la respuesta de la variable de salida en el tiempo, su comportamiento ante perturbaciones del entorno y el porcentaje hardware utilizado. El autor concluye que el PID difuso es superior al

PID clásico por su respuesta en el tiempo y reacción al ruido, sin embargo la cantidad de recursos utilizados fue similar en ambos controladores (Pantoja, 2013).

Tema 8

Estrategias avanzadas para el control de un sistema MIMO de 2 rotores.

En esta tesis el autor propone 4 tipos de controladores para evaluar su funcionamiento frente a un sistema de varias entradas y salidas conformado por dos rotores. Dentro de los controladores elegidos se encuentran: el PID clásico, las redes neuronales, el control adaptable y el control difuso. El objetivo del proyecto realizado es poder determinar que controlador es el más eficiente a la hora de optimizar la respuesta de una planta. Se concluye que los controladores presentan distintas ventajas uno frente a otro pero los que fueron diseñados con particularidades adaptables (control difuso y control adaptable) fueron superiores a los demás debido a su estabilidad en la respuesta en el tiempo a pesar de desconocer el sistema de funcionamiento de la planta (Holguín, 2007).

Tema 9

Implementación y análisis de rendimiento de un control industrial de nivel para tanques con fluidos, basado en lógica difusa.

En esta tesis los autores elaboran un algoritmo de control difuso para manejar una válvula y bomba de un sistema de nivel en un tanque. Su finalidad fue mejorar la eficiencia ante perturbaciones y lograr una mejor calidad de control respecto a la inicial producida por un PID clásico. Para realizar el análisis respectivo se evaluó una serie de pruebas de control y se determinó que el control difuso diseñado fue más eficiente que el PID. Su conclusión fue la implementación de un controlador que reducía el desgaste de los accionadores involucrados en el proceso mantenía la óptima acción de control planteada (Ampuño, Agila, & Cevallos, 2014).

Tema 10

Control Mediante Lógica Difusa.

En este documento científico se describe el uso de la lógica difusa para controlar el ángulo de inclinación de un helicóptero prototipo y la importancia de realizar un diseño adecuado para conseguir una respuesta estable. Los autores comparan el rendimiento de la respuesta del controlador borroso frente a un PID y las conclusiones revelan la superioridad del primero. Se determina además la importancia de agregar ganancias a las entradas del controlador difuso y sumar una variable integral del error a la acción de control para alcanzar mayor estabilidad en la respuesta de la planta (Kuoro & Musalem, 2002).

2.2.Introducción a la lógica difusa.

De forma general, la lógica difusa o borrosa se puede definir como la generalidad de la lógica binaria. Con el objetivo de entender mejor esta comparación es necesario entender que la lógica binaria o booleana es aquella que asigna un valor de verdadero o falso a todos los elementos de un conjunto respecto a una aseveración o característica. La lógica difusa o borrosa, a diferencia de la booleana, se caracteriza por asignar un grado de veracidad a cada elemento de un conjunto evaluado respecto a una característica por lo que ningún objeto será completamente verdadero ni enteramente falso.

Para entender mejor estas definiciones se tomará como ejemplo la planta a ser utilizada en este proyecto. En la variable de nivel y usando la lógica booleana solo puede haber dos posibles conjuntos, niveles altos y bajos representados por verdadero y falso o 1 y 0 respectivamente. Haciendo el mismo razonamiento con la lógica difusa los valores entregados por el sensor serán definidos por un grado de pertenencia que será representado por un valor entre 0 y 1 respecto a la membresía que estos tengan con relación a los conjuntos que se hayan formado. Así, un valor de 45% de nivel será BAJO o 0 según la lógica binaria y con la lógica difusa tendrá un grado de pertenencia de 0.2 para el conjunto ALTO, 0.5 para el conjunto MEDIO y 0.3 para el conjunto BAJO. La razón de definir estas valores y como definirlos aseguran una acción de control adecuada en un sistema. (Olmo, 2008) (Gómez, 2008) (Benito & Durán, 2011).

2.3. Lógica difusa

La lógica difusa o borrosa es un tipo de lógica que emplea valores entre 0 y 1 para determinar la autenticidad de aseveraciones que no son completamente verdaderas ni del todo falsas. Se dice que esta rama de la inteligencia artificial asemeja la manera de pensar de los seres humanos (Benito & Durán, 2011).

Si le preguntásemos a una persona el nivel de agua en un tanque esta nos respondería que se encuentra alto, en el medio o bajo pero no sería capaz de decir con precisión el valor numérico de la posición donde este se halla. De la misma

forma la lógica difusa nos permite hacer uso de rótulos lingüísticos y números para definir la pertenencia a cada conjunto de los objetos analizados. En la lógica difusa todos los elementos de un universo pertenecen en cierto grado a cada conjunto que se forme. (Antsaklis & Passino, 1993).

2.4. Sistemas de control fundamentados en lógica difusa.

Un sistema de control basado con lógica es, como su nombre lo indica, un controlador que hace el uso de la lógica difusa para modelar ordenes que controlen una planta. Generalmente este tipo de controladores están formados por 3 etapas importantes: fusificación o codificación, base del conocimiento y toma de decisiones y defusificación o decodificación de la inferencia. Su función es llevar una señal de salida de una planta a un setpoint determinado a la entrada del sistema realizando el menor esfuerzo de control posible. (Antsaklis & Passino, 1993)

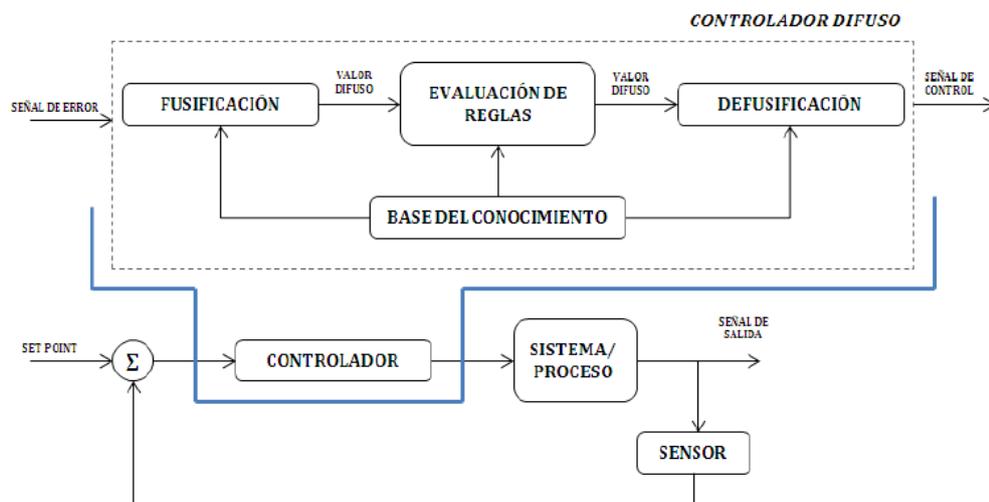


Figura 2.1: Estructura básica de un controlador difuso en lazo de control cerrado.

Elaborado por: Dávila (2013).

En la Figura 2.1 podemos observar la estructura de un controlador difuso y su función de control en una planta en lazo cerrado.

2.5. Control difuso

Son un tipo de control cuya función principal es receptor valores de entrada de una o más variables, procesarlas y entregarlas como una variable de salida que ejerce

una acción de control sobre una planta que generalmente representa un proceso. Este tipo de control se diferencia de los demás debido a que su ingeniería se basa en el uso de lógica difusa. (Gómez, 2008)

2.5.1. Elementos del control difuso.

Los elementos del control difuso se dividen en: universo de discurso, variables de entrada y salida, valores lingüísticos, reglas de control y funciones de membresía para los conjuntos con las que se realizan una serie de operaciones para determinar el control a ejercer.

2.5.1.1. Universo de discurso.

El universo de discurso no es más que el dominio en el cual se realizará la formación de conjuntos difusos. Generalmente, por carácter numérico se considera al universo de discurso como el conjunto de los números reales. No obstante, para tener una mayor facilidad de trabajo, se tomará una sección de los números reales para representar el universo de discurso conocida como: universo de discurso efectivo (Passino & Yurkovich, 1998).

Los límites del universo de discurso efectivo son representados por α y β . Estos puntos son referencias en las que las entradas del controlador se saturan o la salida del mismo ya no tiene efecto sobre la planta. (Passino & Yurkovich, 1998)

2.5.1.2. Conjuntos difusos.

Para entender el concepto de conjunto difuso y su diferencia con los conjuntos clásicos es necesario recurrir al ejemplo de los hombres altos expuesto por Zadeh, uno de los principales filósofos en la formación de estas definiciones. Partimos de la necesidad de formar dos conjuntos de hombres en los que la regla para su clasificación será su estatura. Las personas por arriba de 1.80m formarán el conjunto de los hombres altos y los que estén por debajo de esta estatura estarán en el conjunto de hombres bajos. En otras palabras, una persona que mida 1.79m será parte del grupo de bajos y uno que tenga 1.81m estará en hombres altos. Esto es algo absurdo

si consideramos el hecho que solo hay una diferencia de 2cm entre ellos y en un contexto de evaluación diferente, ambos podrían ser considerados parte del mismo conjunto (Benito & Durán, 2011).

En este principio se basa la lógica difusa y sus conjuntos. En ella todos los elementos del universo de discurso forman parte de todos los conjuntos en un cierto grado representado por un número entre 0 y 1. Regresando al ejemplo planteado entonces el hombre de 1.79m de estatura pertenecerá al conjunto de altos con 0.75 y el 1.81m de altura lo hará con un grado de pertenencia de 0.8. La diferencia según la lógica que se use será que en la clásica un elemento pertenece o no a un conjunto mientras que en la difusa se asigna un grado de pertenencia o membresía a todos los elementos de un conjunto (Benito & Durán, 2011).

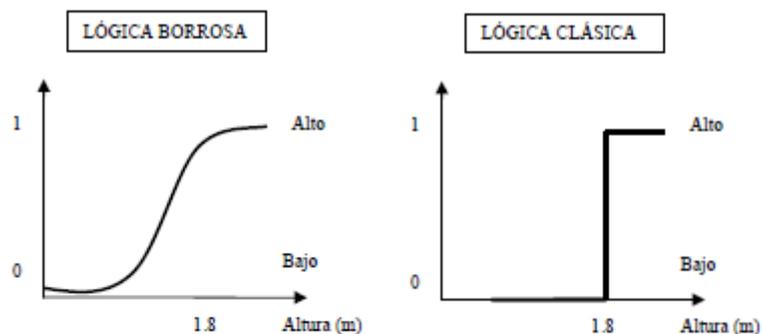


Figura 2.2: Asignación de valor de membresía según la lógica usada.

Elaborada por: Benito & Durán (2011)

En la Figura 2.2 podemos observar de forma más clara la diferencia en el uso de la lógica difusa respecto a la lógica clásica. En la lógica borrosa no existen cambios bruscos de membresía mientras que en la clásica si los hay.

2.5.1.3. Variables, valores y reglas lingüísticas.

Las variables lingüísticas son una serie de expresiones a las acude el diseñador del controlador para determinar las entradas y las salidas del sistema. (Passino & Yurkovich, 1998).

Entonces, tomando como ejemplo la planta usada para evidenciar el funcionamiento del controlador difuso diseñado, las variables de entrada serán “Error” y “Derivada del error” y “Voltaje” la de salida.

Los valores lingüísticos son palabras o etiquetas utilizadas para describir características de las variables de entrada y salida a las que se les designa un rango de valores del universo de discurso. Usualmente se usan adjetivos como: “positivo pequeño”, “cero” o “negativo grande” (Passino & Yurkovich, 1998). Estos términos se asignan de acuerdo al comportamiento de la variable y su función en el sistema. Por ejemplo; si hablamos de la variable de entrada “error” lo más adecuado sería utilizar adjetivos como: “positivo”, “nulo” y “negativo” aunque es el diseñador quien los elige según su comodidad.

Para crear una relación entre las variables de entrada y salida con los valores lingüísticos elegidos es necesario formar un conjunto de reglas seguidas por el controlador para tomar una acción sobre la planta. A este conjunto de reglas se las llama reglas lingüísticas.

Las reglas lingüísticas son un grupo de normas “Si...entonces...” elaboradas para asignar al controlador las pautas que debe de seguir para ejercer su función de diseño. Comúnmente, están conformadas por una premisa haciendo uso de una o más variables de entrada con un valor lingüístico asignado seguidas de un consecuente formado por una o más variables de salida etiquetadas de la misma forma que las entradas. (Passino & Yurkovich, 1998)

Un ejemplo usando las variables del controlador diseñado es:

Si error es positivo grande Y derivada es cero entonces voltaje será alto

La cantidad de reglas será determinada por el número de valores lingüísticos o etiquetas se designen por variable elevado a la cantidad de variables de entrada existentes en el sistema por el número de variables de salida. Así entonces para el caso de nuestra planta de nivel serán 9 reglas (3 etiquetas \wedge 2 entradas * 1 salida). Se podrían agregar más variables de salida a cada regla aunque se sugiere dividir el análisis para que exista una mayor facilidad de diseño (Passino & Yurkovich, 1998).

2.5.1.4. Funciones de membresía.

Según Olmo M. (2008) la medida en que un elemento del universo de discurso forma parte de un conjunto se llama función de membresía. Se simboliza con la letra griega μ .

Son aquellas funciones que denotan la relación existente entre una variable de entrada o salida, una etiqueta y valores comprendidos entre 0 y 1 (Passino & Yurkovich, 1998).

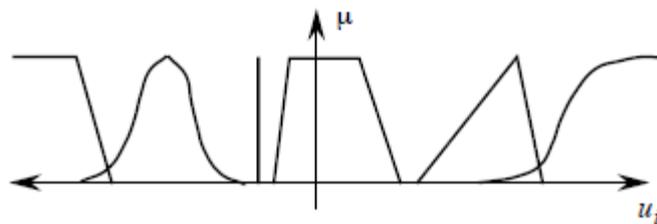


Figura 2.3: Tipos de función de membresía usadas en el diseño de un controlador

Elaborado por: Passino & Yurkovich (1998).

La función triangular es la más usada en el desarrollo de los controladores difusos aunque también es común ver otras formas como: gaussianas, senoidales o trapezoidales como se muestra en la Figura 2.3. La elección del tipo de función de membresía será a conveniencia del ingeniero de acuerdo a sus objetivos planteados al inicio del diseño ya que cada una de ellas le proporcionará un enfoque distinto a los valores lingüísticos elegidos.

2.5.1.4.1. Función triangular.

La función triangular, como ya se mencionó antes, es una de las más usadas al momento de delinear un controlador difuso. Esta consta de tres puntos importantes: sus extremos y su centro los que le darán su forma característica. Cabe destacar que esta no necesita ser simétrica. Es el arquitecto del controlador quien designará estos puntos de trabajo de acuerdo a las características de funcionamiento de la variable.

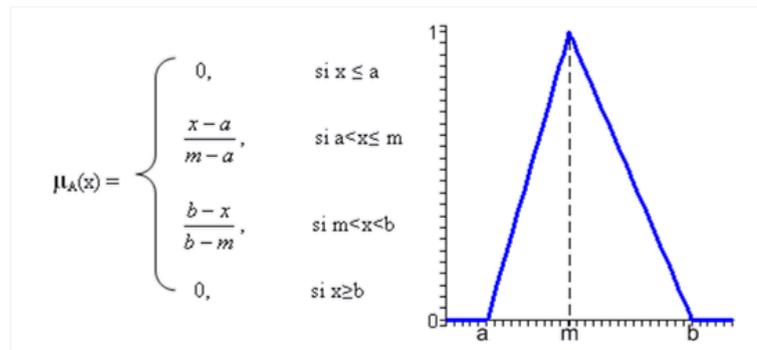


Figura 2.4: Función de membresía triangular y sus parámetros de diseño.

Elaborado por: Olmo (2008).

La definición mostrada en la Figura 2.4 demuestra las pautas para el diseño de una función de membresía triangular donde a es el punto inicial de la función, b es el extremo final de la función y m es el punto central donde se alojará el vértice superior de la función. La variable x será cualquier valor entre a y b con el que se podrá determinar, con la ayuda de la definición expuesta, el valor de membresía para cada punto.

2.5.1.4.2. Función Trapezoidal

La función trapezoidal, como su nombre lo indica, es un tipo de función de membresía cuya forma característica es un trapecoide. Sus puntos más importantes serán: sus extremos y los límites de su base superior.

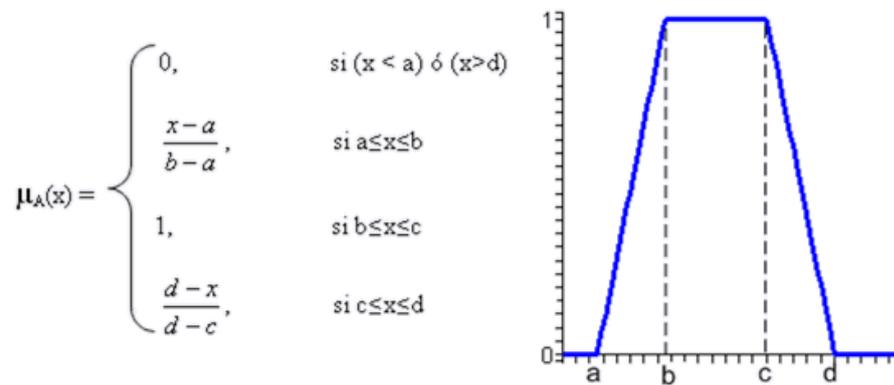


Figura 2.5: Función de membresía trapezoidal y sus puntos de referencia más importantes.

Elaborado por: Olmo (2008)

La Figura 2.5 nos detalla la forma más común de la función trapezoidal; sin embargo, es posible que sus puntos no sean simétricos o que uno de sus lados tienda al infinito.

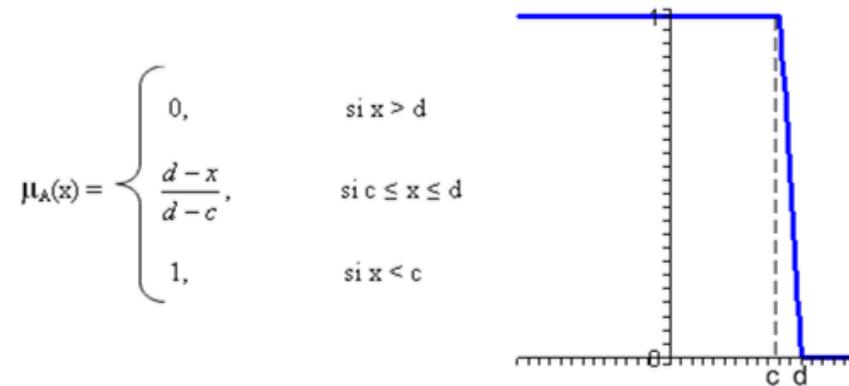


Figura 2.6: Función trapezoidal abierta hacia la izquierda.

Elaborado por: Olmo (2008).

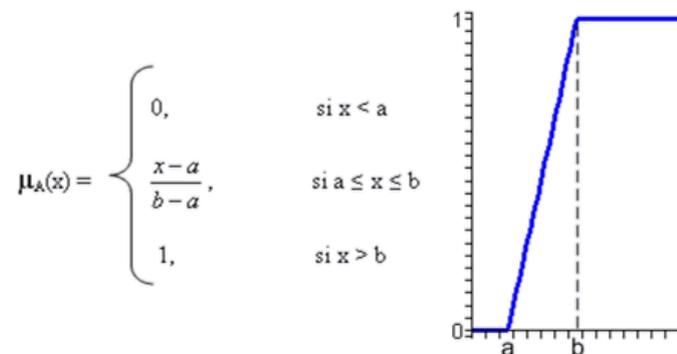


Figura 2.7: Función trapezoidal abierta hacia la derecha.

Elaborado por: Olmo (2008).

Las Figura 2.6 y 2.7 muestran casos especiales de la función trapezoidal donde uno de sus lados tiende al infinito. Generalmente se utilizan estas funciones para definir los extremos de los conjuntos difusos de un universo de discurso.

2.5.2. Operaciones entre conjuntos difusos.

Al igual que con los conjuntos convencionales, existen una serie de operaciones posibles que pueden ser efectuadas con los conjuntos difusos. Sin embargo, en este apartado se detallarán exclusivamente las consideradas necesarias para lograr determinar con éxito la acción de control realizada por un controlador difuso.

2.5.2.1.Unión.

La operación de unión puede ser expresada matemáticamente según Ponce (2010, pp.69) como:

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \text{máx}(\mu_R(x, y), \mu_S(x, y))$$

Se suele representar por el operador matemático “or” y al igual que con la operación unión de los conjuntos normales, se elegirá la zona que involucre a todos los elementos entre los conjuntos como se muestra en la Figura 2.8.

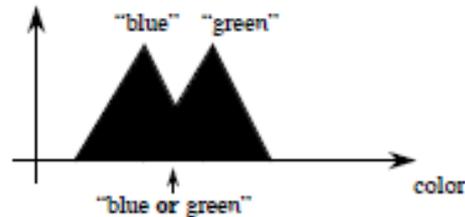


Figura 2.8. Representación grafica de la operación unión entre dos conjuntos difusos.

Elaborado por: Passino & Yurkovich (1998).

2.5.2.2.Intersección.

La intersección entre conjuntos difusos estará definida matemáticamente de la siguiente manera (Ponce, 2010, p.69):

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \text{mín}(\mu_R(x, y), \mu_S(x, y))$$

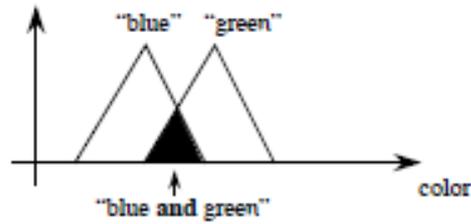


Figura 2.9: Representación gráfica de la operación intersección entre conjuntos difusos.

Elaborado por: Passino & Yurkovich (1998).

Como se observa en su representación gráfica en la Figura 2.9 se tomará la zona que tengan en común los conjuntos involucrados.

2.5.2.3. Complemento.

La operación complemento o negación, en lógica difusa, dará como resultados los elementos que no se encuentren en el conjunto utilizado. Su definición matemática es la siguiente (Ponce, 2010):

$$\mu_R(x, y) = 1 - \mu_R(x, y)$$

2.6. Arquitectura básica de un controlador difuso.

La arquitectura básica de todo controlador difuso se compone de las siguientes partes: fusificación, bases del conocimiento conformadas por las reglas difusas, método de inferencia o evaluación de las reglas planteadas y defusificación. Se detalla a continuación lo más relevante de cada etapa en la Figura 2.10.

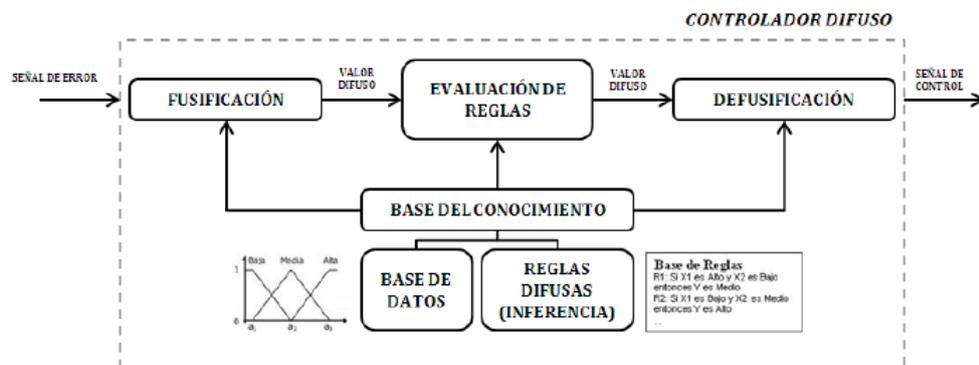


Figura 2.10: Estructura detallada de un controlador difuso.

Elaborado por: Dávila (2013).

2.6.1. Fusificación

Es la etapa en la que se toman los datos ya adquiridos por el sistema y se les asigna un valor lingüístico. La fusificación transforma los valores de entrada en etiquetas que son usadas para nombrar a las funciones de membresía o a los conjuntos del universo de discurso (Ponce, 2010).

En esta paso del diseño se eligen la forma de las funciones de membresía y la cantidad a ser utilizada. Para elegir la forma más adecuada de una función de membresía es necesario considerar la señal emitida por el sensor del sistema. Si el mismo detecta valores exactos se podría usar una función gaussiana o senoidal; mientras que, si su señal posee ruido es mejor condicionar los datos con una función triangular (Antsaklis & Passino, 1993). Cabe recalcar que cuantas más reglas de control se empleen en el diseño del controlador más fina su acción pero a su vez aumentará de manera proporcional la complejidad de implementación.

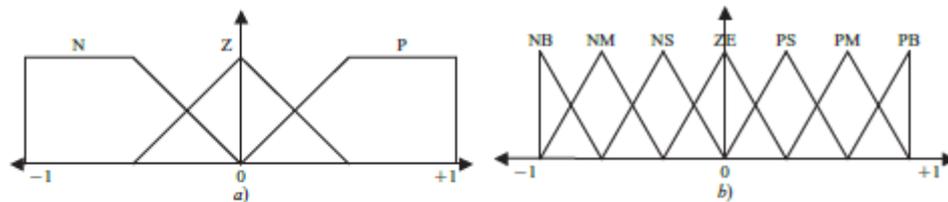


Figura 2.11: Ejemplos de variables de entradas fusificadas de un sistema con diferente cantidad de etiquetas.

Elaborado por: Ponce (2010).

Como se observa en la Figura 2.11, se puede hacer uso de distintas formas y cantidad de funciones de membresía. La Figura 2.11a) consta con 3 etiquetas lingüísticas (N, Z y P), mientras que la Figura 2.11b) posee 7 (NB, NM, NS, ZE, PS, PM y PB). Los valores de entrada del sistema corresponden al eje x mientras que los valores de membresía ocupan el eje y.

2.6.2. Bases del conocimiento.

Esta parte del controlador difuso contiene los objetivos del controlador y las características esenciales del sistema. Generalmente se fundamenta en: información

relevante para el manejo de los datos borrosos y un conjunto de reglas, formadas con proposiciones, basadas en el conocimiento previo acerca del sistema con el fin de optimizar el funcionamiento de la planta (Ponce, 2010).

La finalidad de todo algoritmo de control es poder deducir una acción que sería tomada por un operador en cada evento posible ocurrido en el sistema. Se recomiendan uno de las siguientes 4 métodos expuestos por Sugeno (1985) para desarrollar la base del conocimiento de manera adecuada:

- Conocimiento y experiencia de un experto.
- Diseño a partir de las acciones de control de un operador.
- Diseño del proceso directo.
- Experiencia propia.

2.6.2.1.Método de Mamdani para formar reglas difusas.

El método de Mamdani para formar reglas difusas se basa en la asignación de un acción basada en el comportamiento de una o más variables de salida como resultado del cambio en la conducta de las variables de entrada (Antsaklis & Passino, 1993).

Se centra en el conocimiento adquirido a través de experiencias estudiadas con el sistema. La forma matemática de este método se aprecia a continuación:

Si X es A_1 y Y es B_1 , entonces Z es C_1

Donde X y Y son variables de entrada, A_1 y B_1 son funciones de membresía de cada una respectivamente y C_1 es la acción de control a ejercer sobre la variable de salida Z (UDEP, s.f.).

2.6.2.2.Método de Sugeno- Takagi para formar reglas difusas.

El método de Sugeno- Takagi se fundamenta en la estructura de reglas cuya conclusión es una función basada en el comportamiento de las variables de entrada. Su forma matemática se presenta a continuación:

Si X es A_1 y Y es B_1 , entonces $Z = f_1(X, Y)$

Donde Z será la salida en función a los valores de las entradas (X y Y) y A_1 y B_1 son valores lingüísticos que las definen (Antsaklis & Passino, 1993) (Sugeno, 1985).

2.6.3. Inferencia difusa.

La inferencia difusa es la etapa que se encarga de asignar un valor difuso de salida correspondiente a los datos de entrada cuyo fundamento se basa en las reglas ingresadas en el controlador. El resultado de la inferencia será un conjunto difuso que representa al consecuente para cada regla. La agrupación de estos conjuntos será la salida del sistema de control.

Según UDEP (s.f.) existen cuatro procedimientos que originan mejores acciones de control en un sistema mostradas en la Tabla 2.1. Estos son: inferencia de Mamdani por mínimos R_M , inferencia por productos de Larsen R_L , inferencia de producto drástico R_{DP} y la inferencia del producto limitado R_{BP} (Ambalal, 2004) (Ying, 1993).

Tabla 2.1

Definición matemática de los cuatro métodos de inferencia mas utilizados.

Métodos de inferencia	Definiciones
Inferencia de Mamdani por mínimos R_M	$\min(\mu, \mu_W(z)), \forall z$
Inferencia por productos de Larsen R_L	$\mu \times \mu_W(z), \forall z$
Inferencia de producto drástico R_{DP}	$\begin{cases} \mu & \text{para } \mu_W(z) = 1 \\ \mu_W(z) & \text{para } \mu = 1 \\ 0 & \text{para } \mu < 1 \text{ y } \mu_W(z) < 1 \end{cases}$
Inferencia del producto limitado R_{BP}	$\max(\mu + \mu_W(z) - 1, 0)$

Nota: μ_W es la función de pertenencia del conjunto de salida llamado w . Fuente: UDEP. (s.f.)

Bibliocentral. Obtenido de:

http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf.

2.6.3.1. Método de inferencia de Mamdani.

El sistema de inferencia de Mamdani es uno de los más utilizados para evaluar controladores difusos. Su base se fundamenta en operaciones de máximos y mínimos entre las funciones de membresía involucradas en la entrada del sistema para obtener un valor de membresía difuso correspondiente a una acción de control en la salida (Garay, s.f.).

Tomando el ejemplo propuesto por Antsaklis & Passino (1993) se puede comprender mejor este procedimiento. Se parte de dos reglas de control que van a actuar sobre diferentes estados de la salida.

Regla 1: **Si X es A_1 y Y es B_1 , entonces Z es C_1**

Regla 2: **Si X es A_2 y Y es B_2 , entonces Z es C_2**

Se aplica la definición del método de inferencia de Mamdani por mínimos quedando expresadas de la siguiente manera:

$$\text{Regla 1: } w(1) = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0))$$

$$\text{Regla 2: } w(2) = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0))$$

Cada uno de estas expresiones se evalúa como una función de membresía para la salida correspondiente. Para obtener al final el conjunto difuso resultante inferido se obtiene el máximo de las funciones de membresía del consecuente.

$$\text{Resultante: } C' = \max(\mu_{C_1}^{-1}(w(1)), \mu_{C_2}^{-1}(w(2)))$$

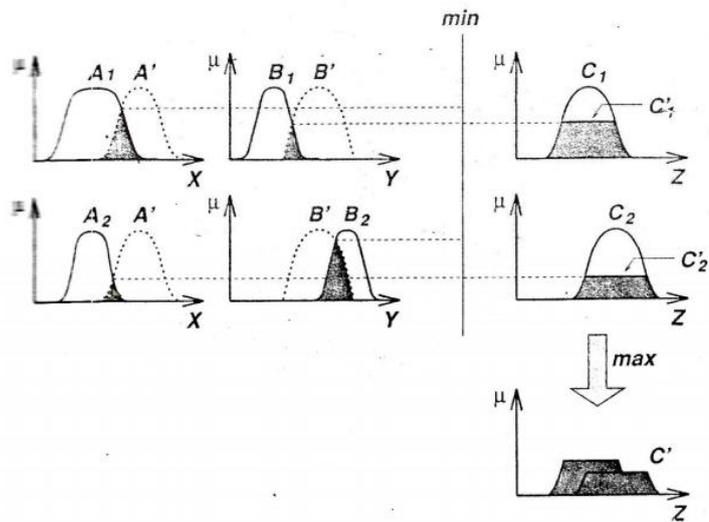


Figura 2.12: Explicación del método de Mamdani visto desde un punto de vista gráfico.

Elaborado por: Garay (s.f.).

En la Figura 2.12 podemos apreciar que el resultado de esta serie de operaciones es un conjunto representado por el área sombreada llamada C' graficada en la variable de salida. De este conjunto difuso provendrá la acción de control realizada por el sistema.

2.6.4. Defusificación

Etapa encargada de transformar los conjuntos difusos resultantes de los anteriores pasos a números reales. Para llevar a cabo esta conversión se han desarrollado una serie de métodos dentro de los que se destaca el del centroide. Dependiendo del método utilizado variará el resultado obtenido en la defusificación (UDEP, s.f.)

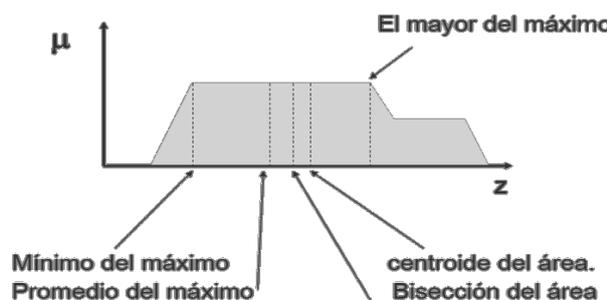


Figura 2.13: Representación gráfica de varios métodos de defusificación.

Elaborado por: Garay (s.f.).

2.6.4.1.Método del Centroide

El método del centroide, centro de área o centro de gravedad, transforma el conjunto difuso de salida, producto de la inferencia, en números reales que la planta puede procesar (UDEP, s.f.). Matemáticamente se define de forma continua o discreta como se muestra a continuación:

$$z^* = \frac{\int_a^b \mu(z) z dz}{\int_a^b \mu(z) dz} \quad z^* = \frac{\sum_{z=a}^b \mu(z) \cdot z}{\sum_{z=a}^b \mu(z)}$$

Donde z^* equivale el centro de gravedad de un grupo de masas formado por cada función de membresía de los conjuntos difusos resultantes en la variable de salida (Dávila, 2013).

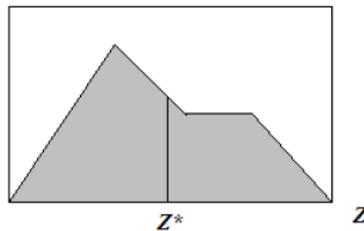


Figura 2.14: Conceptualización gráfica del centro de área.

Elaborado por: Dávila (2013).

Su aplicación se resume a tres pasos expuestos por Ponce (2010):

- Segmentar la función de pertenencia en los puntos respectivos formando dos áreas de las cuales se utilizará la inferior.
- Se unen todas las áreas formadas en un solo conjunto.
- Se obtiene el centro de gravedad haciendo uso de las fórmulas ya descritas y tomando como muestra los puntos más relevantes de la figura generada usualmente comprendidos por 0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1.
- El resultado será la acción de control ejercida sobre la planta.

CAPITULO 3

DISEÑO DEL PROYECTO.

3.1.Descripción general de la planta de nivel.

El sistema a utilizarse para el desarrollo y prueba del controlador difuso es una planta cuya variable será el nivel de agua de un tanque con características industriales.

La módulo de tanques y elementos electrónicos de potencia mencionados fue donado a la Facultad Técnica para el Desarrollo por Dave Méndez en su trabajo de titulación en que se describe el uso de un controlador PID para el manejo de el nivel y temperatura de este sistema (Méndez, 2014). La idea al utilizar esta planta es lograr contrastar con éxito el funcionamiento de ambos controlador.



Figura 3.1: Planta de nivel seleccionada para las pruebas del controlador difuso.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

El modelo utilizado consta de dos tanques hechos con acero inoxidable (0.55m de altura y 0.32m de diámetro) ubicados como se muestra en la Figura 3.1. El tanque 1 (TK-01) ubicado en la parte inferior sirve como reservorio de agua y el tanque 2 (TK-02) es utilizado para medir el nivel de agua y tomar órdenes respecto a esta

variable. Se simula una pérdida de agua mediante la apertura de una válvula manual tipo bola que, mediante una serie de tuberías, devuelve el agua a TK-01. Para determinar la altura en donde se encuentra el agua se utiliza un sensor analógico resistivo que, junto a un circuito reductor de voltaje elaborado por los autores, se reduce su salida de 0V a 5V. El control del nivel se centra en el manejo del trabajo de una bomba lo cual se logra a través de la acción ejercida por el módulo difuso transmitida al accionador por un variador de frecuencia.

3.1.1. Modelo matemático de la planta de nivel.

La función de transferencia que simula el funcionamiento de la planta de nivel es tomada de la tesis elaborado por Méndez (2014, pp. 77-81) la cual tiene la siguiente función de transferencia:

$$G = \frac{0.051}{s + 0.033}$$

Para entender mejor el comportamiento de la planta la Figura 3.2 muestra a continuación su respuesta en lazo cerrado simulada mediante la herramienta Simulink de Matlab.

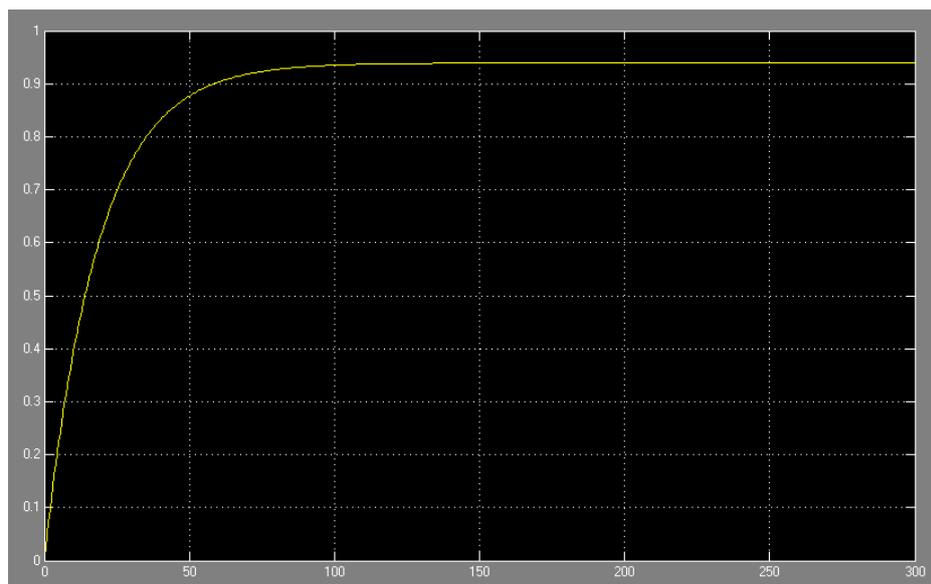


Figura 3.2: Respuesta en lazo cerrado de la función de transferencia de la planta.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

Podemos apreciar que, a pesar que su respuesta es bastante estable, el tiempo de estabilización es aproximadamente 100 segundos y que su error en estado estacionario es casi del 7%. Esto nos da una pauta sobre los objetivos que queremos alcanzar con el diseño del controlador.

3.2. Diseño del controlador difuso.

El diseño de cualquier controlador inicia al definir sus variables de entrada y salida. Es importante proceder en este paso de manera adecuada ya que será la base de los procedimientos realizados por el controlador. Luego de elegidas las variables de entrada y salida se especifican las etiquetas de valor y sus funciones de pertenencia para finalmente concretar las reglas de interacción entre ellas y así poder seleccionar el mecanismo de inferencia y la defusificación de la respuesta.

La forma estructural del controlador sería como se muestra a continuación en la Figura 3.3:



Figura 3.3: Esquema estructural del diseño del controlador.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

Como ya se mencionó en instancias anteriores de este documento, se utilizará *FIS Editor* de *Matlab* como plataforma de desarrollo para evaluar la cantidad de reglas a utilizar, el tipo de función de transferencia más conveniente y como afecta a la respuesta de la planta.

3.2.1. Definición de variables de entrada del controlador difuso.

Para definir las variables de entrada se debe partir analizando el sistema como un todo. La acción del controlador inicia cuando el usuario ingresa un valor de setpoint

al cual debe de establecerse la respuesta de la planta. El bloque de control se encarga de monitorear el cambio de la variable y que tan próxima esta se encuentra de llegar al punto deseado por lo que en base a estos dos parámetros se deben de definir sus conjuntos difusos.

La diferencia que existe entre el punto deseado y el estado actual de la variable será el primer conjunto difuso el cual será llamado “Error”. Igual de importante es conocer la velocidad de cambio de esta diferencia ya que le proporcionará una idea al controlador del efecto que está teniendo la fuerza de control ejercida. La manera de determinar esta rapidez de cambio matemáticamente es mediante el uso de una derivada la cual representará el segundo conjunto de entrada nombrado “Derivada del Error”.

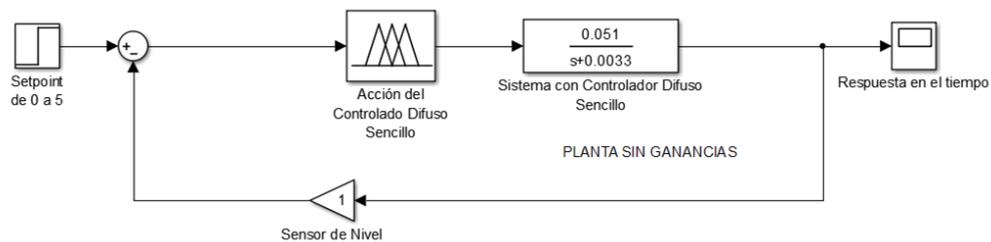


Figura 3.4: Diagrama de bloques del sistema general..

Elaborado por: Los Autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

La Figura 3.4 detalla un esquema un poco más claro de la estructura del controlador.

3.2.1.1. Conjunto difuso “Error”.

En el conjunto difuso “Error” se incluirá la forma característica de sus funciones de membresía y su dominio con el fin de que en etapas futuras de este proyecto pueda ser implementado sin problema.

Para determinar su rango se evalúan dos casos particulares: cuando el nivel del agua se encuentre por debajo del setpoint y cuando el nivel del agua se encuentre por arriba de este. Si el nivel del agua es inferior al setpoint el conjunto “Error” recibirá

valores positivos ya que la diferencia entre estos dos puntos será mayor a cero. Sin embargo, en el caso inverso sus valores serán negativos debido a que el sensor enviará datos mayores que el referente.

Considerando que el sensor entregará al microcontrolador solo valores entre 0v y 5v, la mayor diferencia positiva será “+5” para el caso en que se quiera llenar el tanque totalmente y este se encuentre vacío y la negativa más pequeña será “-5” en el evento de desear el tanque vacío y el mismo se encuentre lleno.

Por conveniencia de implementación se asignarán 3 funciones de membresía que llevarán los nombres: “*Positivo*”, “*Cero*” y “*Negativo*”. Los mismos ocuparán una serie de valores adecuados de tal forma que se eviten los inconvenientes por ruido en el sensor. La Figura 3.5 muestra la asignación designada para las etiquetas de valor escogidas.

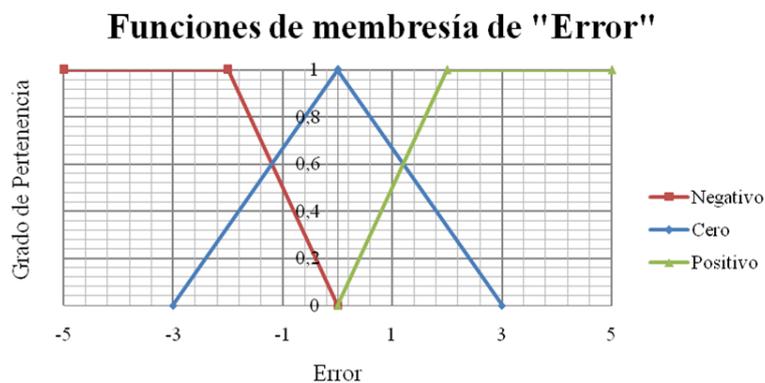


Figura 3.5: Funciones de membresía del conjunto difuso “Error” expresadas gráficamente.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

3.2.1.1.1. Formulas del conjunto difuso “Error”.

En esta sección se adjuntan las funciones de membresía del conjunto difuso “Error” y su respectivo dominio, con el fin de facilitar la programación del mismo en el microcontrolador. La forma de cada función es elegida de forma arbitraria por los diseñadores del controlador con el fin de facilitar la implementación del sistema. Las funciones para todos los eventos posibles se muestran en la Tabla 3.1; estas relaciones serán de utilidad también al momento de entender los resultados reflejados por *Matlab*.

Tabla 3.1

Funciones de membresía del conjunto difuso "Error".

Etiqueta de valor	Dominio	Función
Función "Error Positivo"	$x < -2$	$y = 1$
	$0 > x > -2$	$y = -0,5 x$
	$x > 0$	$y = 0$
Función "Error Cero"	$0 > x > -3$	$y = 0,33 x + 1$
	$3 > x > 0$	$y = -0,33 x + 1$
	$x < -3 \vee x > 3$	$y = 0$
Función "Error Negativo"	$x < 0$	$y = 0$
	$2 > x > 0$	$y = 0,5 x$
	$x > 2$	$y = 1$

Nota: La variable x corresponde al valor que toma el error y la variable y representa la función que corresponde a ese grupo de valores. Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

3.2.1.2. Conjunto difuso "Derivada del error".

Como ya se ha mencionado antes, la "Derivada del error" es un conjunto difuso de suma importancia para el controlador ya que le ayudará a determinar el efecto de la fuerza de control ejercida. Entender esta velocidad de cambio es crucial ya que determinará el tiempo en que el módulo deberá trabajar.

Para establecer los valores límites del dominio de este conjunto se debe encontrar cuál es la velocidad de cambio máxima y mínima que se manejará en la planta. Realizando pruebas en el laboratorio se midió que a su máxima frecuencia la bomba produce un cambio de 0.29 Voltios/Segundos en el sensor que mide el nivel del agua, valor que, en el reductor de voltaje produce una variación de 0.05 Voltios/Segundos y su mínimo con la bomba apagada y la válvula de desfogue abierta totalmente fue 0.12 Voltios/Segundos.

Al igual que con el conjunto difuso "Error" se eligieron tres funciones de membresía llamadas "Negativa" "Cero" y "Positiva" y, de la misma forma se toman valores de dominio que no produzcan ruido por procesamiento de su señal. En la Figura 3.6 se puede apreciar con mejor detalle lo comprendido en el conjunto difuso "Derivada del error".

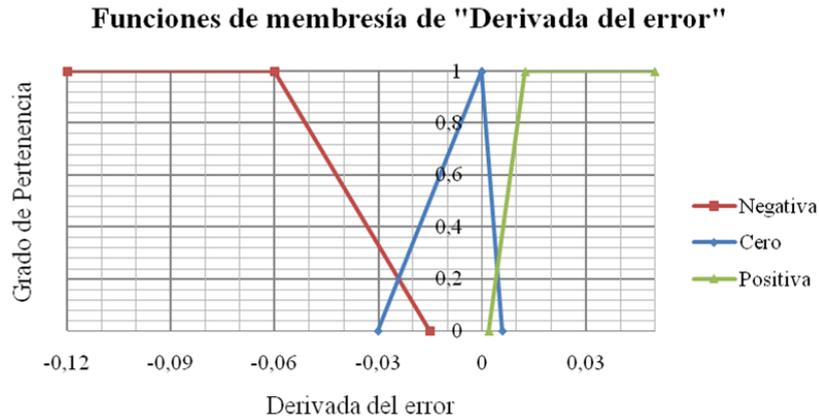


Figura 3.6: Funciones de membresía del conjunto difuso “Derivada del error” expresadas gráficamente.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

3.2.1.2.1. Formulas del conjunto difuso “Derivada del error”.

Siguiendo los mismos pasos que con el anterior conjunto de entrada, se obtienen las funciones de membresía con el objetivo de comprender mejor el trabajo realizado por cada una y facilitar la tarea de implementación. La tabla 3.2 muestra, de forma organizada, las funciones encontradas y su correspondencia con cada sección del dominio total.

Tabla 3.2

Funciones de membresía para el conjunto difuso “Derivada del Error”.

Etiqueta de valor	Dominio	Función
Función "Derivada Positiva"	$x < -0,0625$	$y = 1$
	$-0,015 > x > -0,0625$	$y = -22,02 x - 0,33$
Función "Derivada Cero"	$x > -0,015$	$y = 0$
	$0 > x > -0,0302$	$y = 33,1125 x + 1$
	$0,00625 > x > 0$	$y = -160 x + 1$
Función "Derivada Negativa"	$x < -0,0302 \vee x > 0,00625$	$y = 0$
	$x < 0$	$y = 0$
	$0,0125 > x > 0,003125$	$y = 106,66 x - 0,33$
	$x > 0,0125$	$y = 1$

Nota: La variable x representa cualquier valor posible que puede tomar la derivada del error y la variable y su grado de pertenencia. Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

3.2.2. Definición de variables de salida del controlador difuso.

Definir las variables de salida del controlador en primera instancia puede ser complicado si no se tiene claridad del alcance del bloque utilizado. Es necesario recordar que el dominio de la variable de salida fijará el rango de valores posibles que el controlador podrá ofrecer para manejar a la planta y elegir un valor muy pequeño o grande podría reducir su alcance o mostrar un desempeño irreal respectivamente.

Para el caso de la planta de nivel se podría creer que la unidad entregada es frecuencia lo cual es falso. Es importante entender que, a pesar de poseer un variador de frecuencia para manejar a la bomba, el mismo es manejado por un microcontrolador que transmite la señal defusificada a la planta. Esto quiere decir que, la variable de salida será el voltaje otorgado por uno de los pines del chip.

3.2.2.1. Conjunto difuso “Voltaje”.

El conjunto difuso “Voltaje” ocupará el rango de valores de salida que el controlador podrá entregar. Su dominio abarca desde 0v hasta 5v, los cuales son los datos que generalmente entrega un microcontrolador en cualquiera de sus pines.

Para una operación de control más agresiva, se definen 3 etiquetas de valor llamadas “*Baja*”, “*Media*” y “*Alta*” que no incluirán toda la gama de puntos posibles. Serán funciones triangulares con una base pequeña como se muestra en la Figura 3.7. El objetivo al escoger estos dominios tan pequeños es obligar a la bomba a trabajar al 100% de su capacidad la mayor cantidad de tiempo posible y cuando esta necesite compensar la pérdida de agua funcione con el mínimo necesario.

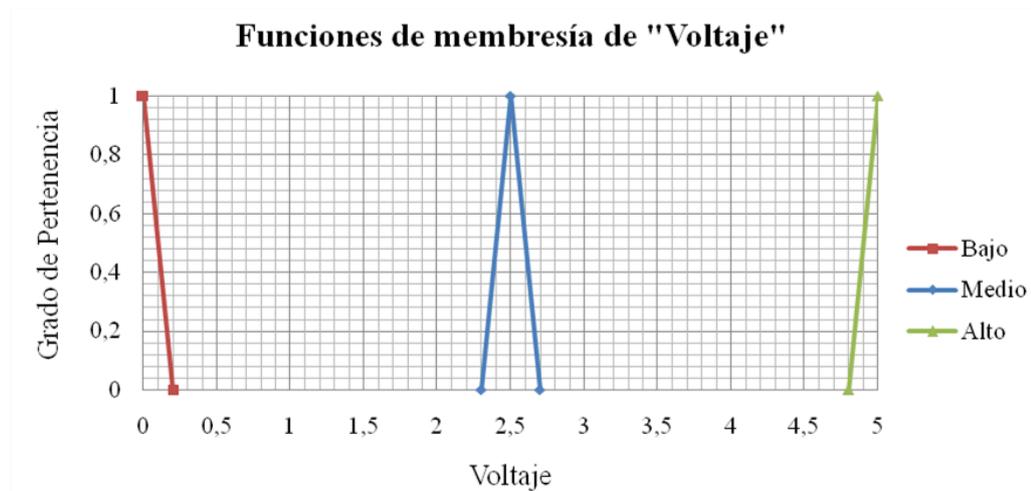


Figura 3.7: Funciones de membresía del conjunto difuso “Voltaje” expresadas gráficamente.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

3.2.2.1.1. Fórmulas del conjunto difuso “Voltaje”.

Se detalla a continuación en la Tabla 3.3 las funciones resultantes para determinar la acción de control correspondiente en la variable de salida.

Tabla 3.3:

Funciones de membresía del conjunto difuso de salida “Voltaje”

Etiqueta de valor	Dominio	Función
Función "Derivada Positiva"	$x < 0$	$y = 1$
	$0,2 > x > 0$	$y = -5x + 1$
Función "Derivada Cero"	$x > 0,2$	$y = 0$
	$2,3 > x > 2,5$	$y = 5x - 11,5$
	$2,5 > x > 2,7$	$y = -5x - 13,5$
Función "Derivada Negativa"	$x < 2,3 \vee x > 2,7$	$y = 0$
	$x < 4,8$	$y = 0$
	$5 > x > 4,8$	$y = 5x - 24$
	$x > 5$	$y = 1$

Nota: La variable x es cualquier valor que tome el conjunto “Voltaje” y y su grado de membresía para ese rango de valores. Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

3.2.3. Desarrollo de reglas de control.

La formación de las reglas de control se la elaborará con el método de Mamdani en el que los estados de la variable de salida son el producto de condiciones de las variables de entrada. Se enlista a continuación la base de datos conformada por las leyes diseñadas.

- Si Error es "Negativo" y Derivada es "Negativa" entonces Voltaje es "Bajo".
- Si Error es "Negativo" y Derivada es "Cero" entonces Voltaje es "Bajo".
- Si Error es "Negativo" y Derivada es "Positiva" entonces Voltaje es "Medio".
- Si Error es "Cero" y Derivada es "Negativa" entonces Voltaje es "Bajo".
- Si Error es "Cero" y Derivada es "Cero" entonces Voltaje es "Bajo".
- Si Error es "Cero" y Derivada es "Positiva" entonces Voltaje es "Medio".
- Si Error es "Positivo" y Derivada es "Negativa" entonces Voltaje es "Alto".
- Si Error es "Positivo" y Derivada es "Cero" entonces Voltaje es "Alto".
- Si Error es "Positivo" y Derivada es "Positiva" entonces Voltaje es "Alto".

Estas 9 reglas escritas pueden ser confusas de manejar de la forma presentada por lo que se diseña una pequeña matriz detallada en la Tabla 3.4 con la que se pueden apreciar de manera más simple.

Tabla 3.4

Matriz de reglas de control de la base de datos de Inferencia.

Reglas de control		Derivada del Error		
		Neg.	Cero	Pos.
Error	Neg.	Bajo	Bajo	Medio
	Cero	Bajo	Bajo	Medio
	Pos.	Alto	Alto	Alto

Nota: Las clasificaciones utilizadas *Pos.* y *Neg.* representan las palabras *Positiva/o* y *Negativa/o* respectivamente. Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

3.2.4. Defusificación de la señal de salida.

Para defusificar es primordial determinar, en el controlador, el procedimiento a ser seguido. Con la finalidad de comparar los datos con éxito en el simulador *FIS*

Editor y estudiar los resultados de las interacciones, se eligió el método del centroide de Mamdani. Esta fórmula es ingresada, más adelante, entre las líneas de programación del código compilado en el microcontrolador.

3.3. Modelado del sistema en Matlab.

Antes de implementar el circuito en una placa y realizar pruebas de forma física en el módulo es necesario comprobar si el diseño de los conjuntos de entrada y salida es correcto. Un simulador matemático como *Matlab* es muy útil en estos casos ya que cuenta con todas las herramientas necesarias para demostrar lo deseado.

La construcción del sistema se realiza en la herramienta *Simulink* la cual es una extensión de *Matlab* capaz de representar el funcionamiento de un sistema mediante asignación de bloques a cada etapa.

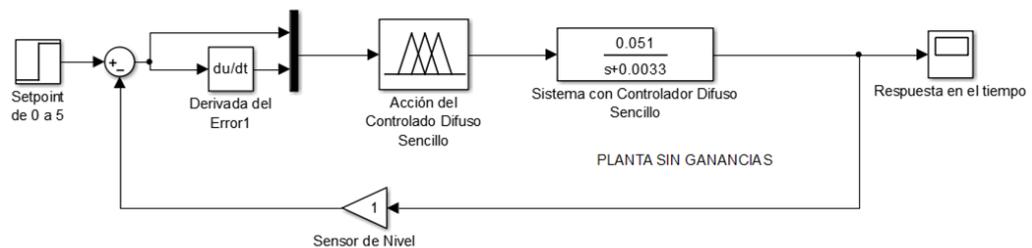


Figura 3.8: Diagrama de bloques del sistema con sus entradas.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

La Figura 3.8 muestra el diagrama de bloques del sistema con el cual se realizarán todas las pruebas matemáticas competentes antes de construirlo electrónicamente. El bloque *Fuzzy Logic Controller* representa la acción que ejerce el controlador diseñado.

3.3.1. Programación del controlador en Matlab.

Para la programación de los conjuntos difusos, etiquetas de valor y reglas de control se hará uso de *FIS Editor*. Este es un instrumento de *Matlab* que generará el mecanismo de control y será de utilidad para entender su comportamiento.

El procedimiento inicia escribiendo el comando “*fuzzy*” en la ventana de comandos de Matlab lo que generará la ventana de trabajo de *FIS Editor*. Esta herramienta permite elegir la cantidad de variables con las que se desea trabajar, el método de inferencia, la forma de escritura de las reglas, el rango de las variables, etc.

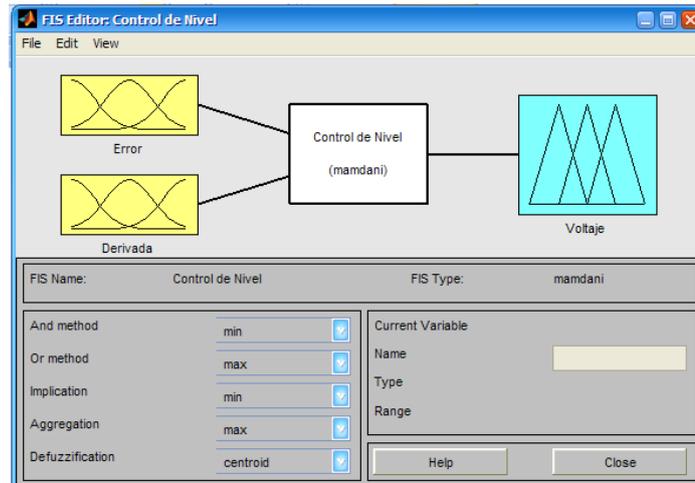


Figura 3.9: Ventana de trabajo de FIS Editor.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez).

En la Figura 3.9 se puede apreciar una configuración inicial hecha por los autores en la que ya se encuentran definidas las variables del controlador (Error, Derivada y Voltaje), método de inferencia (Mamdani) y de defusificación (Centroide).

3.3.1.1. Configuración de la variable de entrada “Error”.

Para iniciar la configuración de la variable error se da doble click en el cuadro con su nombre en la ventana inicial. En esta ventana podremos definir el rango de la variable, la forma de la función característica y sus puntos de operación.

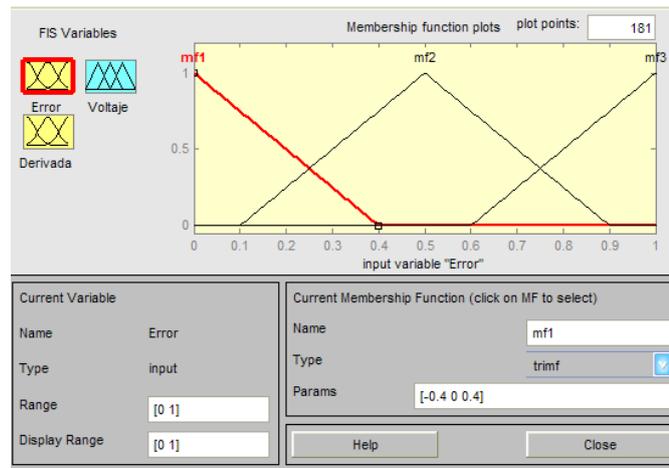


Figura 3.10: Ventana de configuración de la funciones de membresía.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

La Figura 3.10 muestra la ventana para configurar las funciones de membresía. Como primer punto se eligen la cantidad de etiquetas a utilizar y el rango en el cual estas se desplegarán que para el caso del conjunto Error será $[-5 +5]$.

Luego se elige la forma de cada función en el recuadro *Type*. Aquí se puede optar entre distintas formas características de funciones de membresía. Cabe recalcar que no es posible seleccionar las funciones abiertas hacia la izquierda o la derecha por lo que la solución será poner los valores extras fuera del dominio del conjunto. Finalizado esto se le asigna un nombre a cada función escogida que para el caso sería “*Negativo*”, “*Cero*” y “*Positivo*”.

Lo último por realizar sería insertar los puntos de acción sobre los que las funciones de transferencia trabajarán. Para realizar esto solo se cambian los valores en el campo *Params* que representan los puntos que tomará el eje x cuando su grado de membresía sea 1 ó 0. Se ingresan de izquierda a derecha y el número de cantidades por designar variará de acuerdo a la forma de la función. En este paso es importante tomar en cuenta la Tabla 3.1 como referencia para lograr designar los valores con éxito y lograr las formas prediseñadas en la Figura 3.5.

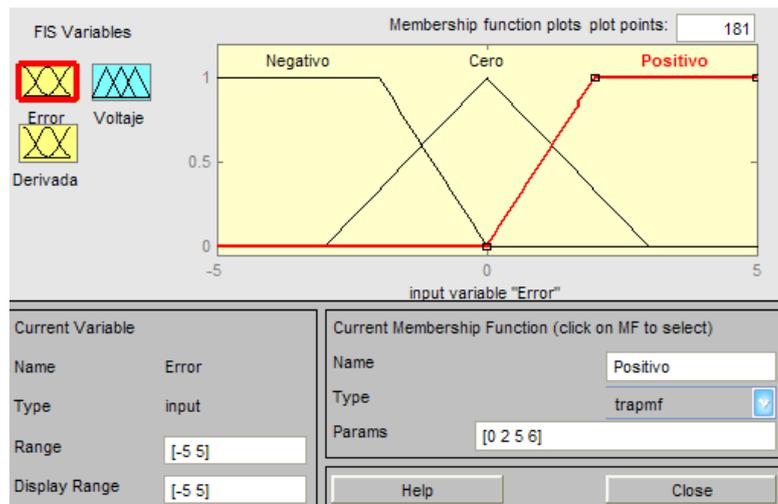


Figura 3.11: Funciones de membresía de la variable “Error” configuradas.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

En la Figura 3.11 se puede observar las funciones de membresía ya configuradas con los parámetros deseados. Es importante notar que las funciones “*Negativo*” y “*Positivo*” poseen una función de transferencia trapezoidal cuyo punto final se digita fuera del dominio de x .

3.3.1.2. Configuración de la variable de entrada “Derivada del Error”.

Para configurar la variable de entrada “Derivada del Error” simplemente se sigue el mismo procedimiento realizado en el punto anterior pero tomando en consideración los datos anotados en la Tabla 3.2 y la referencia visual de la Figura 3.6.

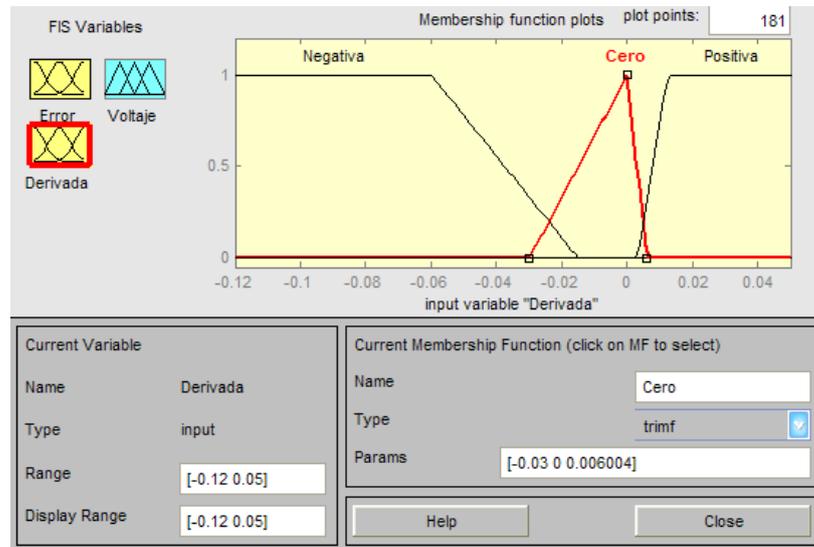


Figura 3.12: Funciones de membresía de la variable “Derivada del Error” configuradas.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

La Figura 3.12 muestra el resultado final luego de ingresar los datos correspondientes a la “Derivada del error”. Se puede apreciar la similitud que posee con las gráficas de la Figura 3.6.

3.3.1.3. Configuración de la variable de salida “Voltaje”.

Para configurar la salida del controlador se procede de la misma manera que se establecieron las entradas. La única diferencia destacable será que ahora las funciones de los extremos serán triangulares abiertas por lo que el punto más alejado del dominio de x se ubicará fuera del mismo para que tome esta forma. Se recalca además el uso de la Tabla 3.3 para poder definir con éxito los puntos de apoyo de cada función de membresía y llegar a las funciones descritas en la Figura 3.7.

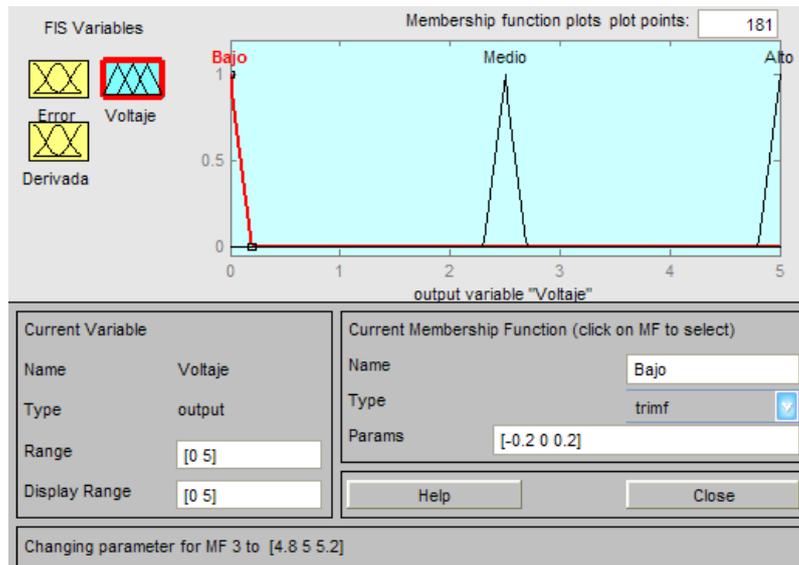


Figura 3.13: Funciones de membresía de la variable de salida “Voltaje”.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

La Figura 3.13 muestra lo obtenido al terminar el ingreso de los datos más importante del “Voltaje” de salida.

3.3.1.4. Ingreso de reglas de control.

Luego de haber definido las funciones de membresía para todas las variables del controlador se procede a definir la base del conocimiento conformada por las reglas de control. Para configurar las reglas de control simplemente se abre la ventana *Rule Editor* haciendo click a *Rules* desde el menú desplegable *Edit*.

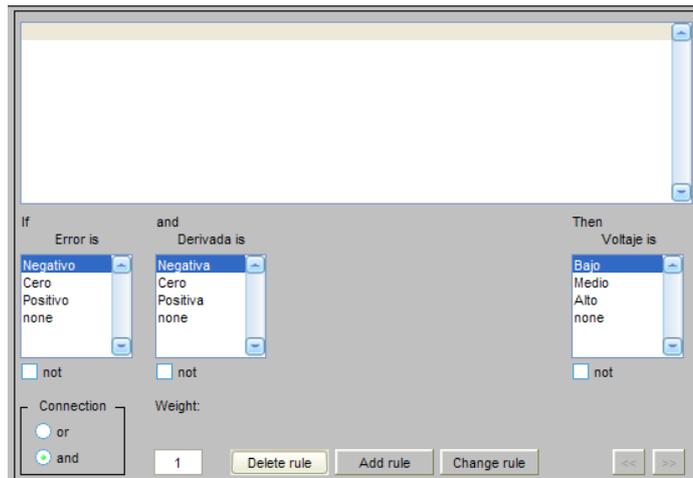


Figura 3.14: Ventana del *Rule Editor*.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

Desde la ventana mostrada en la Figura 3.14 es posible formar la base del conocimiento del controlador. Simplemente se elige la etiqueta de valor de cada variable de entrada y el efecto que produce en la variable de salida representada por otra etiqueta desde la lista desplegable, ubicada en el punto inferior de cada conjunto difuso, y haciendo click el botón *Add Rule* al final del procedimiento. Se puede ver además que es posible elegir el tipo de conector (*and* ó *or*) para relacionar las variables de entrada y el peso que se quiere dar a cada regla [0 1]. Se toma como referencia la matriz de la Tabla 3.4 para que exista una mayor claridad al momento de definir el estado de cada variable.

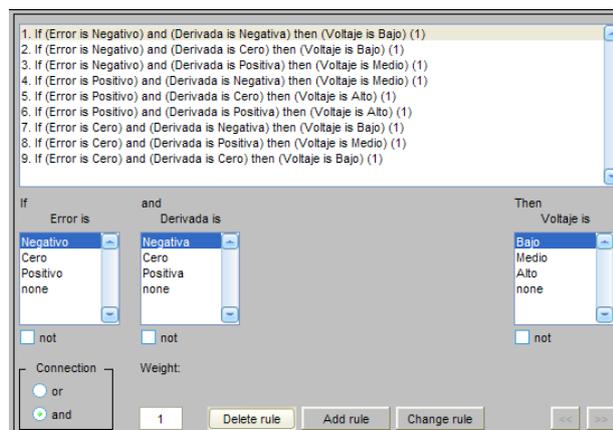


Figura 3.15: Base del conocimiento del controlador difuso.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

3.3.1.5. Análisis de la respuesta del controlador.

Antes de combinar la función de transferencia de la planta con el controlador es importante entender la respuesta del mismo observando las interacciones entre sus variables. *FIS Editor* ofrece la oportunidad, al diseñador, de analizar esto mediante una herramienta tipo visor en la que puede conocer la respuesta del controlador. Haciendo click en *Rules* o *Surface*, del menú desplegable *View*, el arquitecto puede observar, de forma numérica y gráfica, la respuesta de la salida del controlador ante un cambio de los valores de entrada de cada una de las variables.

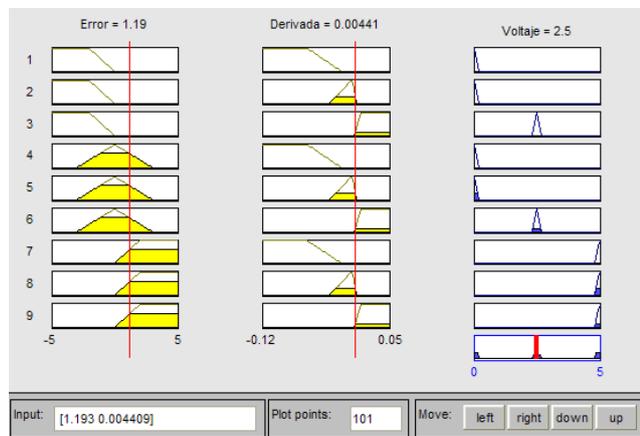


Figura 3.16: Representación numérica de la respuesta del controlador.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

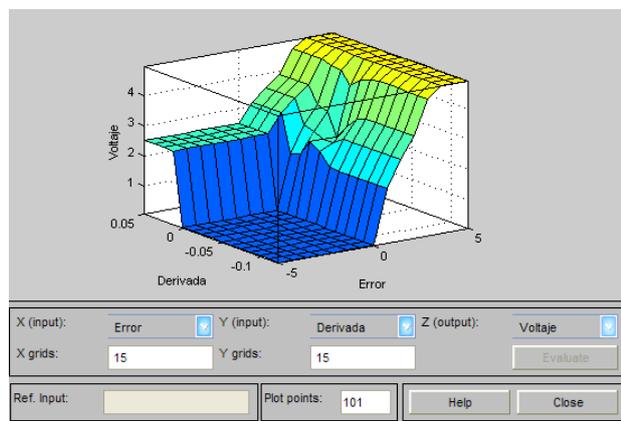


Figura 3.17: Representación gráfica de la respuesta del controlador.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

En la Figura 3.16 se puede apreciar las reglas de control utilizadas y la respuesta del controlador numérica ante los valores ingresados por el usuario en el recuadro *Input*. La Figura 3.17 muestra una representación más general del conjunto de valores que puede tomar la variable de salida. Las zonas de color azul serán las que tendrán una respuesta más pequeña mientras que las amarillas asumirán valores más altos de control.

A simple vista, es posible observar en la Figura 3.17 que el controlador responderá de forma adecuada ante las necesidades del sistema ya que en el evento de producirse diferencias grandes de “Error” este se hará presente con una acción agresiva obligando a la bomba a trabajar a todo su capacidad; sin embargo, a medida que este contraste disminuye, la acción de control se vuelve más fina, ofreciendo valores más cercanos al cero para así solo compensar la pérdida de nivel producida por la válvula. Si el diseñador se encuentra conforme con las reglas de control y su acción el último paso es exportarla al ambiente de trabajo de *Matlab* para poder hacer su llamado desde el bloque de control difuso en *Simulink*. No obstante, aún en estas instancias es posible modificar la respuesta del controlador mediante el cambio de los puntos de asentamiento de las funciones de membresía o las reglas de control.

3.3.2. Análisis de la respuesta en el tiempo del sistema con el controlador.

La respuesta de un sistema en el tiempo es uno de los parámetros más importantes que el diseñador posee para calificar el éxito de la acción de control. Antes de analizar el sistema se debe elegir la programación que va a utilizar el bloque de control difuso lo cual se realiza haciendo doble click en este y escribiendo el nombre con el cual se exportó el archivo de configuración bosquejado.

La Figura 3.18 muestra la salida de la planta del sistema con y sin controlador y a simple vista se puede apreciar que el tiempo de respuesta, establecimiento y porcentaje de error mejora de forma destacable usando un controlador difuso; no obstante, es importante recalcar que el tiempo de subida de la respuesta de la planta con controlador puede ser reducido; lo que sugiere posibles cambios al diseño de la estructura del controlador.

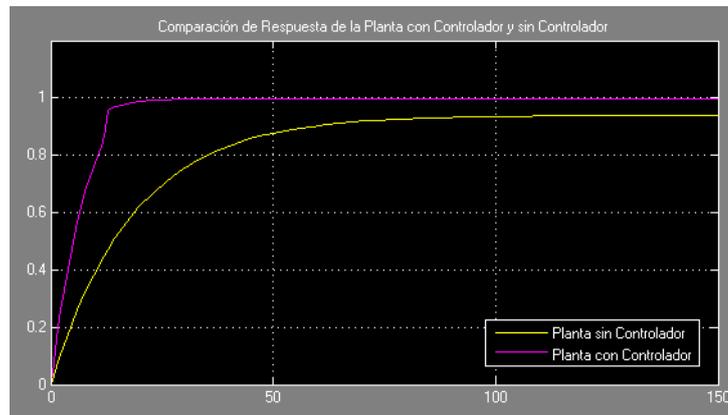


Figura 3.18: Respuesta de la planta con controlador vs la planta sin controlador.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

3.3.3. Ganancias P y D del controlador.

Generalmente un controlador difuso se vale de su programación y estructura para alcanzar el objetivo trazado por el diseñador pero, a pesar de esto, existen casos en los que es necesario hacer uso de otros recursos como ganancias a las entradas del controlador o una variable adicional.

Por temas de diseño e implementación, agregar una tercera variable de entrada al controlador no suele ser la opción más viable debido a las complicaciones que esto puede traer (Jantzen, 1998). Sin embargo, modificar las señales de entrada del controlador puede traer consecuencias positivas a su funcionamiento. Se modifica el diagrama de bloques como se muestra a continuación en la Figura 3.19.

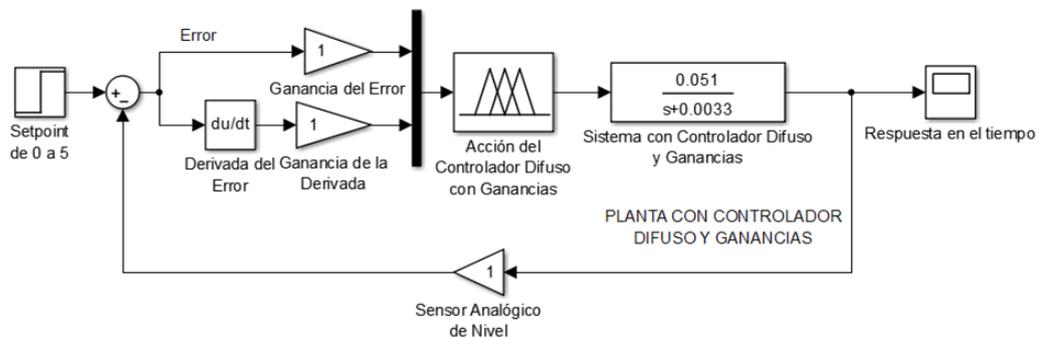


Figura 3.19: Cambios estructurales del diseño del controlador

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

En la Figura 3.19 es posible notar la ubicación de las ganancias agregadas a cada variable para tener mayor manejo de cada una. Luego de varias pruebas se determinó que los valores más adecuados para generar una respuesta estable de la planta manteniendo aceptable el tiempo de subida son los mostrados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5:

Ganancias del controlador difuso.

Entrada del sistema	Ganancia
Error	4
Derivada	0,01

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

La respuesta del sistema con las ganancias se puede apreciar en la Figura 3.20 en la que se distingue con claridad su mejoría con respecto a su respuesta sin la intervención de la entrada integral ni las ganancias.

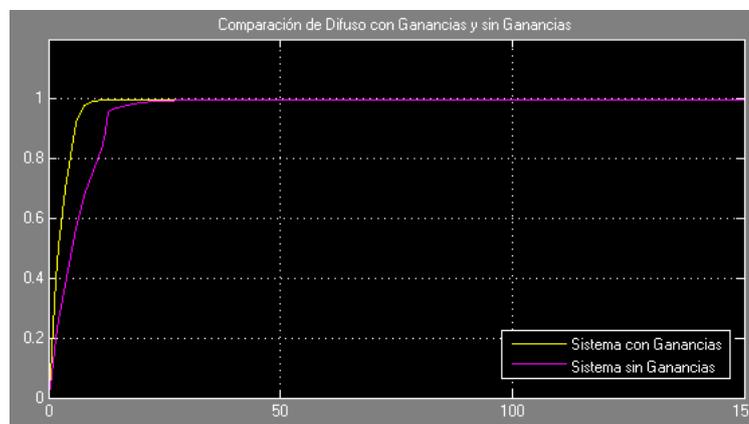


Figura 3.20: Comparación de la respuesta del sistema con y sin ganancias.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

3.4.Comparación de Respuesta en el tiempo versus controlador PID.

Con propósitos de estudio se comparan las salidas de control del sistema con el controlador PID que maneja la planta actualmente y el controlador diseñado. Lo ideal sería realizar mediciones in situ; sin embargo, no es posible debido a que la planta es de lenta respuesta debido al tamaño del tanque y la limitación de la frecuencia de la

bomba. Para evidenciar el contraste de funcionamiento se utiliza *Simulink* y se simulan ambos diagramas de bloques a la vez. La Figura 3.21 muestra la respuesta del sistema con el uso de estos controladores.

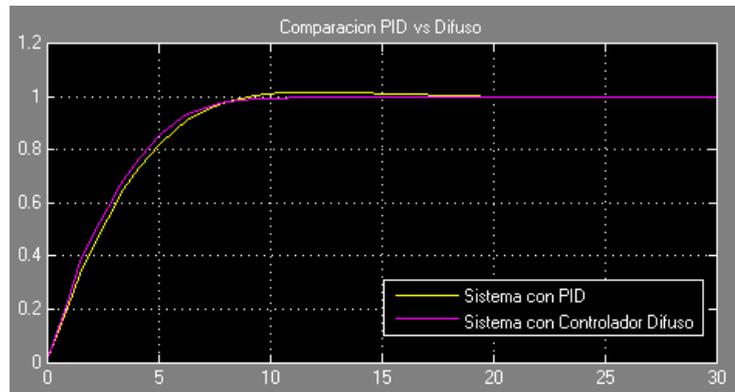


Figura 3.21: Comparación de la respuesta del sistema con controlador PID vs Difuso.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

Aunque la respuesta de los dos sistemas es muy aceptable es indudable la superioridad de la respuesta del sistema con el uso del controlador difuso. Con el uso del PID la respuesta posee un overshoot del 2% y su tiempo de estabilidad redondea los 21.75 segundos, mientras que con el controlador difuso el overshoot es menor al 1% y el tiempo de estabilización es aproximadamente 12.4 segundos. Respecto al error en estado estacionario ambas respuestas poseen un error menor al menor al 0.1% respecto al setpoint.

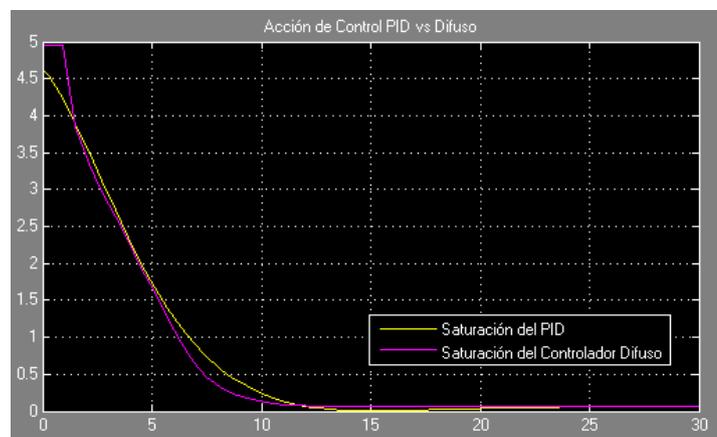


Figura 3.22: Comparación de esfuerzo de control realizada por el controlador PID vs Difuso.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

La acción de control realizada por ambos controladores se muestra en la Figura 3.22 donde podemos ver que el controlador difuso permanece mayor tiempo en saturación que el PID; no obstante, este tiempo es considerablemente corto por lo que no afectaría a la salida del controlador.

En resumen se puede evidenciar a breves rasgos la superioridad del controlador difuso al manejar una planta de nivel frente al controlador PID; pese a esto, al momento de implementar un controlador cualquiera de los dos es una excelente opción para el caso de la planta de nivel planteada.

CAPITULO 4

IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

4.1. Diseño electrónico del módulo de control.

La base para diseñar un circuito electrónico es primero entender la finalidad de su construcción. Para el caso del módulo propuesto el objetivo es controlar la frecuencia de funcionamiento de una bomba por medio de reglas previamente definidas basadas en los datos recibidos por un sensor de nivel.

Como primer punto, se debe realizar la elección del microcontrolador que será el cerebro de este módulo; luego adjuntar una serie de circuitos de apoyo para que el mismo pueda ejercer su acción de control completa y por último hacer las pruebas pertinentes necesarias antes de su implementación.

El propósito de la construcción de este módulo es, además de ejercer el control del sistema, lograr la versatilidad en el manejo de variables que posee un equipo industrial y a su vez reducir costos de implementación. Es importante destacar que, durante la construcción del módulo, se adjuntarán elementos que podrían ser considerados innecesarios para la función que necesita llenar en la planta de nivel; sin embargo, agregar estas etapas extras le serán de utilidad al diseñador del controlador para lograr manejar variables de diferente tipo sin inconveniente.

4.1.1. Elección del microcontrolador.

El fundamento para escoger el microcontrolador se basa en las funciones que este realizará. El chip deberá lograr manejar al menos dos variables de entrada y una de salida y procesar una serie de operaciones matemáticas de todo tipo.

Para las entradas es importante recordar que, a pesar de hablar de 3 entradas en cierto punto del desarrollo, solo se trata de una sola a la cual se le realiza una serie de procesos matemáticos para obtener a partir de esta las restantes. La entrada “Derivada del Error” e “Integral del Error”, como sus nombres lo indican, no son nada más que la derivada e integral de la diferencia entre el setpoint y el punto en el

cual se encuentra la variable de entrada. La única entrada física que recibirá el microcontrolador será la señal transmitida por el sensor de nivel la cual ayudará a determinar la variable “Error”.

La salida del controlador, como ya se mencionó es una variación de voltaje, entre 0 y 5 voltios ya que se desea manejar un variador de frecuencia cuya señal de control se fundamenta en un cambio de voltaje; sin embargo, si el usuario desea remover este elemento y manejar la bomba directamente sería fundamental tener una señal que entregue un pulso modulado. Contar con un microcontrolador que tenga esta característica sería de utilidad para ampliar el campo de acción del módulo.

El usuario deberá poder observar el procesamiento de los datos en tiempo real por lo que sería importante que el micro pudiera contar con la posibilidad de manejar una pantalla LCD. Es necesario agregar que el procesamiento de datos debe hacerse de forma rápida para que el control logre a ser efectivo por lo que el microcontrolador deberá contar con la posibilidad de manejar un reloj externo cuya velocidad sea al menos de 8MHz.

Luego de analizar todos estos puntos se determinó que el microcontrolador que cumplía con estas características fue el 18f4550.

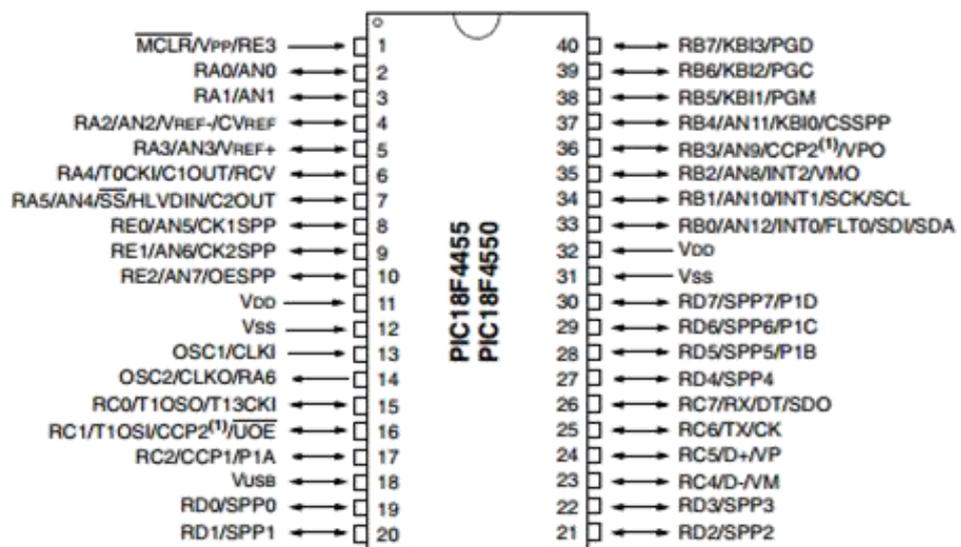


Figura 4.1: Diagrama de pines del microcontrolador 18f4550.

Elaborado por: Microchip Technology Inc., (2006 pp.2)

La Figura 4.1 muestra el arreglo de los pines que posee el microcontrolador escogido y, como se puede observar a simple vista, este cuenta con todas las características necesarias para el desarrollo del proyecto. Cabe recalcar que la búsqueda de este elemento electrónico tuvo que ser limitada al mercado local debido al cumplimiento de las fechas de entrega. No obstante, la unidad elegida supera lo deseado por lo que no es necesario su reemplazo para un mejor desempeño del controlador.

4.1.2. Circuitos de apoyo para el microcontrolador.

A pesar de ser el microcontrolador el elemento central del módulo es trascendente indicar que este no puede por sí solo realizar todo el manejo del sistema. Un microcontrolador suele ser un elemento de características frágiles y es por esto que se deben de agregar ciertos circuitos anexos a su diseño para lograr que este controle sus variables sin inconvenientes.

Asegurar una fuente que suministre el voltaje y corriente necesaria, botones para el manejo de distintas operaciones y circuitos operacionales para realizar cálculos complejos son algunos de los anexos que deberán adjuntarse al chip para que este funcione sin problemas.

4.1.2.1.Reguladores de 5 Voltios DC.

El objetivo de esta fuente será lograr suministrar 5 voltios DC con suficiente corriente para que el microcontrolador pueda trabajar sin problema alguno. El microcontrolador realiza todos sus procesos basados en el funcionamiento de esta fuente y es ahí donde radica su importancia. La Figura 4.2 muestra el circuito usado para suministrar el voltaje necesario y, a pesar de no ser un diseño complejo es muy eficaz.

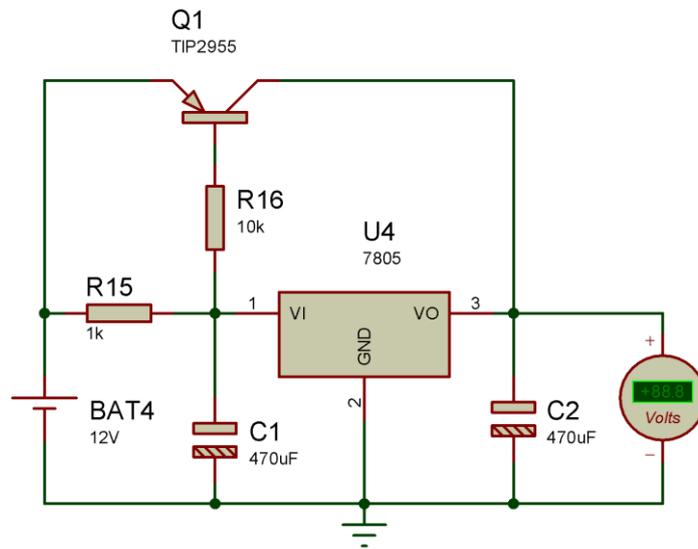


Figura 4.2: Circuito regulador de 12V DC a 5 V DC con 3A de corriente.

Elaborado por: Los Autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

El control de un proceso se fundamenta en la correcta retroalimentación realizada por los sensores. Si el controlador recibe una mala referencia del estado de la variable su acción no podrá ser realizada de forma correcta; generalmente estos sensores funcionan a un voltaje distinto al de un microcontrolador e ingresar su señal directamente a este podría no ser interpretada de forma correcta. Es por esto que, se adjunta al micro un circuito, centrado en el uso de un potenciómetro de precisión, mediante el cual se regula el voltaje enviado por el sensor para que el mismo se ajuste a la entrada del microcontrolador sin perder sus datos compilados. La Figura 4.3 muestra lo descrito a continuación:

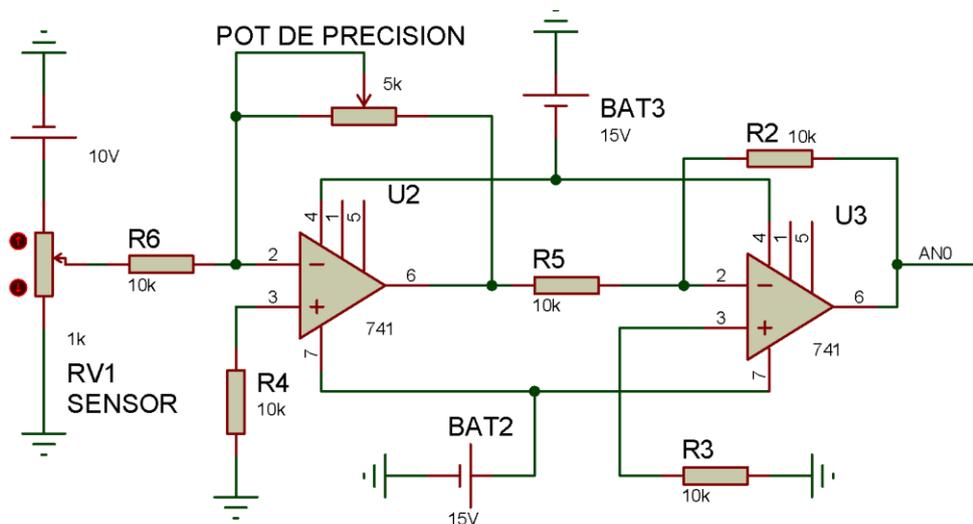


Figura 4.3: Circuito reductor de voltaje para el sensor de entrada.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

El circuito de la Figura 4.3 se basa en la conexión de dos amplificadores operacionales con configuración inversora procurando que una de sus resistencias del primer opam sea el potenciómetro de precisión. De esta forma se producirá una reducción del voltaje, regulada por el usuario, desde 12V DC hasta 5V DC.

Para generar robustez se agrega al diagrama general el circuito de una fuente de computadora paralelo a la fuente de poder regulada. Esto se hace con la finalidad de darle al usuario la posibilidad de cambiar la fuente de poder en caso de daño de la primera o por falta de corriente ya que una cuenta con 3A y la otra con 5A.

4.1.2.2. Control general de las entradas del microcontrolador.

Anexo al microcontrolador se adjuntará un circuito que ayudará a seleccionar ciertos estados de trabajo del microcontrolador como por ejemplo: tipo de salida, setpoint, tipo de entrada, etc. Este circuito contará con varios elementos electrónicos que cumplirán las siguientes funciones:

- 8 botones para usos varios de los usuarios
- 1 potenciómetro con el cual se podrán realizar pruebas acerca de las reglas de control sin uso del sensor.

- 1 potenciómetro para elegir el setpoint de forma manual.
- 1 potenciómetro para modificar el contraste de la pantalla LCD.

El arreglo electrónico para el funcionamiento de estos botones y potenciómetros se muestra en las Figuras 4.4 y 4.5

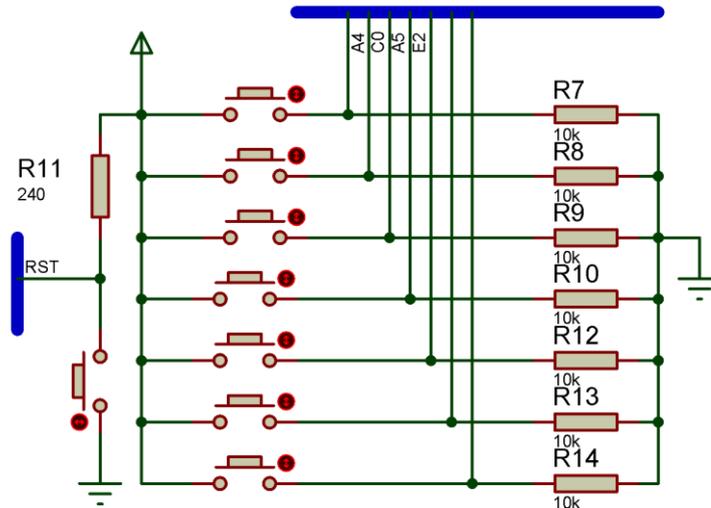


Figura 4.4: Circuito de conexión de los botones y sus pines acción.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

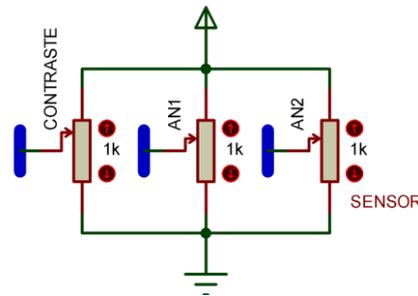


Figura 4.5: Circuito de conexión de los potenciómetros y sus pines de acción.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

Los tres potenciómetros producirán una variación de voltaje entre 0V y 5V que será leída por el microcontrolador y determinará una acción a realizar.

4.1.2.3. Salida PWM.

Como la finalidad del módulo es lograr el control de cualquier planta, al diseño del controlador se le adjunta un circuito el cual ayudará a aislar la salida PWM del microcontrolador a través de un optoacoplador y la misma puede ser aumentada mediante el uso de un relé. El voltaje adicional, para este caso, será el suministrado por la fuente de la planta (24V DC o 10VDC). La Figura 4.6 muestra el circuito diseñado para cumplir esta función.

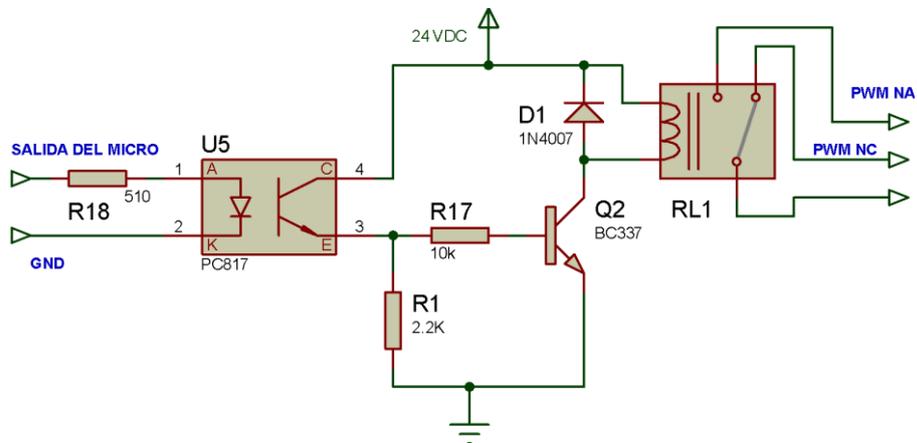


Figura 4.6: Circuito para aislamiento y envío de la señal PWM emitida por el microcontrolador.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

Con el fin de controlar la frecuencia de funcionamiento de la bomba es necesario darle órdenes de trabajo al variador. Este solo recibe órdenes de tipo analógicas entre 0V y 10V por lo que es imperativo escalar y convertir la señal del microcontrolador. Para llevar a cabo esta actividad se usa una señal PWM la cual transmitirá el valor de salida producido por el microcontrolador como una variación de voltaje respecto a una referencia, en este caso 5V y 0V.

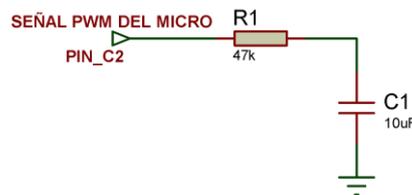


Figura 4.7: Circuito enviar señal PWM.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.1.2.4. Puerto USB para programación del microcontrolador.

Al tratarse de un módulo para ser usado por los estudiantes una de sus características deberá ser su funcionalidad, por lo que se le agregará al mismo un puerto USB tipo B por el que se podrá modificar la programación del microcontrolador gracias al bootloader ingresado en el mismo. El bootloader es una configuración previa que es implantada en el microcontrolador a través de un compilador con la finalidad de que su programación pueda ser modificada sin la necesidad de tarjetas adicionales.

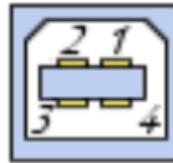


Figura 4.8 Esquema de conexiones del puerto USB tipo B.

Elaborado por: Kioskea (2014, pp. 2)

En la Figura 4.8 se muestra el esquema de conexiones del puerto que será adjuntado. El pin 1 del puerto representa la fuente de alimentación (5V), el pin 2 y 3 se usan para enviar y recibir datos (-D y +D) y el pin 4 es para conectar el cable de tierra.

4.1.3. Elección de la pantalla LCD.

Para poder visualizar los datos sin problema alguno se decide que lo más conveniente sería utilizar una pantalla LCD de 20 x 4 caracteres. En esta se podrán apreciar dos pantallas que le muestren al usuario todos los datos competentes acerca del proceso que esté sucediendo en tiempo real como: el error, la derivada del error, la integral del error, el setpoint, el valor de membresía de salida, etc. Se adjunta además a sus conexiones un potenciómetro para regular el contraste de la misma. La Figura 4.9 muestra las conexiones necesarias para su uso con el microcontrolador.

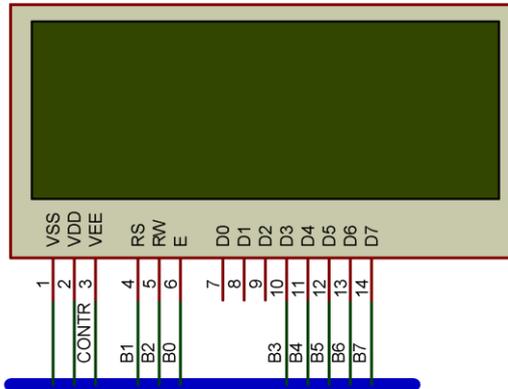


Figura 4.9: Conexión de la pantalla LCD con el microcontrolador.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.1.4. Asignación de funciones a cada puerto del microcontrolador.

Generalmente, los microcontroladores constan de varios puertos cuya función es recibir y enviar datos programados por el usuario. Para lograr asignar la función de cada uno de estos puertos es bueno tomar como referencia la distribución de los pines del microchip de la Figura 4.1 ya que algunos de ellos han sido diseñados por el fabricante para cumplir funciones específicas.

El puerto A, como se aprecia en la Figura 4.1, muestra además las siglas AN en sus pines que representan entradas analógicas, por lo que este será el puerto que se utilizará para recibir la señal de entrada y salida que no sean de tipo digital como es el caso del sensor (AN0), el ingreso del setpoint mediante un potenciómetro (AN1) y la señal de prueba del módulo (AN2). Además de estas entradas, el puerto A recibirá la señal de un cristal de cuarzo de 8MHz, para aumentar la velocidad de procesamiento de las señales, en sus pines A7 y A6 lo cuales han sido designados por el fabricante para cumplir con esta actividad.

El puerto B será el utilizado para el control de la LCD. Se elige este puerto debido a que habitualmente en las librerías de programación de los microcontroladores es el puerto que asignan los fabricantes para desempeñar esta función.

Las labores del puerto C se centran en el envío de dos señales PWM desde sus terminales C1 (CCP2) y C2 (CCP1) previamente destinados en el datasheet para cumplir con este trabajo. La señal PWM proveniente de C1 será utilizada para el manejo del circuito de la Figura 4.7 formado por el optoacoplador y el relé para un control de potencia mientras que la PWM de C2 expuesta de forma directa. Además de estos pines, se utilizarán C4 (D-) y C5 (D+) reservados para el envío y recepción de señales del puerto USB. Los pines del microcontrolador restantes se usan para conexión de los botones agregados como instrumentos de diseño para futuros proyectos realizados en el módulo.

4.2.Programación del microcontrolador 18f4550.

Para programar la función requerida en el microcontrolador se utiliza el lenguaje C, el cual es muy versátil para diseñar este tipo de tareas. El programa para escribir todos los comandos elegidos será *Pic C* y la escritura de esta programación en el microcontrolador se realizará a través de una tarjeta programadora llamada *PicKit 2*.

Se realizarán ciertas pruebas del diseño realizado en *Proteus* aunque, debido a la falta de realidad de la simulación de esta plataforma, se decide en cierto punto proseguir con las pruebas directamente en el módulo construido. La Figura 4.10 muestra un diagrama de flujo básico acerca del funcionamiento de la programación realizada.

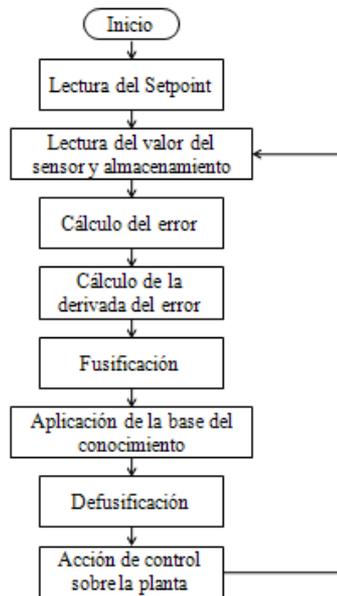


Figura 4.10: Diagrama de flujo básico del funcionamiento del controlador difuso.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.1. Definir el setpoint.

Para definir el setpoint se reciben los datos proporcionados por el potenciómetro ubicado en el Pin AN1 a través de un lector de datos analógicos. Este espera hasta que exista una variación en la entrada y registra este dato que es mostrado en la pantalla LCD.

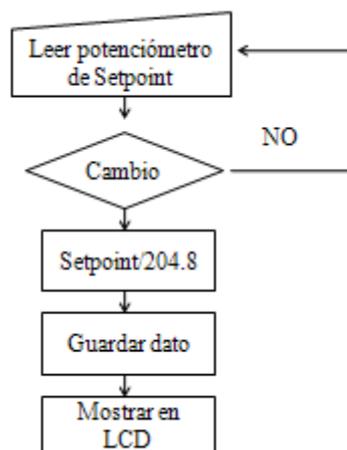


Figura 4.11: Diagrama de flujo del setpoint.

Elaborado por: (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza),

En la Figura 4.11 se muestra la manera de obtener el setpoint en la que, se divide el valor seleccionado por el usuario y se lo divide para 204.8 para obtener una aproximado analógico entre 0 y 5.

4.2.2. Datos de entrada del sensor.

La entrada del sensor, al igual que el setpoint, es una entrada analógica que se guarda como una variable *float* en la programación. Está será mostrada al usuario a través de la LCD para una mejor interacción con él.

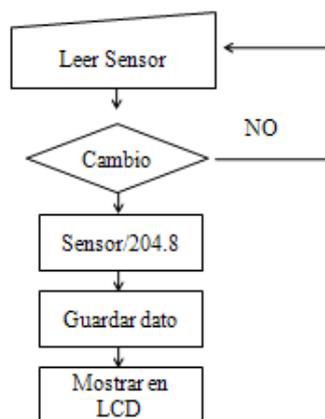


Figura 4.12: Diagrama de flujo de los datos recibidos por el setpoint.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.3. Error.

El error, como ya fue definido en capítulos anteriores en este documento, es la diferencia entre el setpoint y la señal del sensor por lo que se realiza una resta entre los valores de cada una de estas entradas la cual es mostrada en la pantalla LCD para conocimiento del usuario.

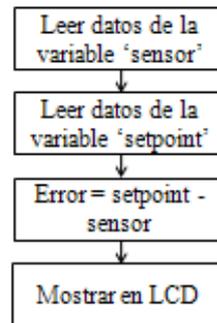


Figura 4.13: Diagrama de flujo del error.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.3.1. Membresía para los conjuntos de Error.

Para determinar el grado de membresía de cada conjunto se hacen uso de las funciones detalladas en la Tabla 4.1 con sus respectivos rangos. Para cada rango se hace uso de un subprograma que envuelva las posibles combinaciones de funciones que puede tomar el valor error. La Tabla 4.1 muestra los rangos sobre los cuales se programa las funciones de membresía.

Tabla 4.1.

Casos programados de los conjuntos de Error con sus funciones.

Caso	Dominio	Función	Conjunto Involucrado
Caso 1	$x < -3$	$y = 1$	Error "Negativo"
Caso 2	$-2 > x > -3$	$y = 1$ $y = 0,33x + 1$	Error "Negativo" Error "Cero"
Caso 3	$0 > x > -2$	$y = -0,5x$ $y = 0,33x + 1$	Error "Negativo" Error "Cero"
Caso 4	$2 > x > 0$	$y = -0,33x + 1$ $y = 0,5x$	Error "Cero" Error "Positivo"
Caso 5	$3 > x > 2$	$y = -0,33x + 1$ $y = 1$	Error "Cero" Error "Positivo"
Caso 6	$x > 3$	$y = 1$	Error "Positivo"

Nota: Los casos especificados son el nombre de cada subprograma y, para cada uno, la x representará el Error y la variable y representará el valor de membresía para cada conjunto como una variable *float*. Elaborado por: Los Autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

La programación se basa en asignar un valor de membresía a cada conjunto creado para luego ser evaluadas en las reglas.

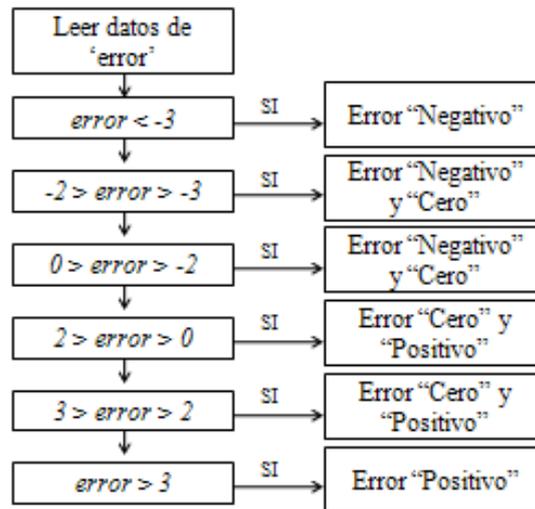


Figura 4.14: Diagrama de flujo de los casos del error.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.4. Derivada del error.

Para encontrar la derivada del error se recurre al concepto esencial de esta operación matemática. La derivada de cualquier función es equivalente a la pendiente en cualquier punto de esta, es decir, que para encontrar la derivada del error es necesario encontrar la pendiente en uno de sus puntos evaluados. La pendiente es igual a la división entre la diferencia entre un punto inicial menos uno final sobre el tiempo transcurrido para que ocurra ese cambio.

Partiendo entonces de ese concepto, es necesario generar un espacio en la memoria del microcontrolador en el que se almacenen dos valores con su tiempo de cambio para encontrar el cociente entre estos y luego reemplazarlos por otros nuevos valores. El diagrama a continuación muestra lo explicado.

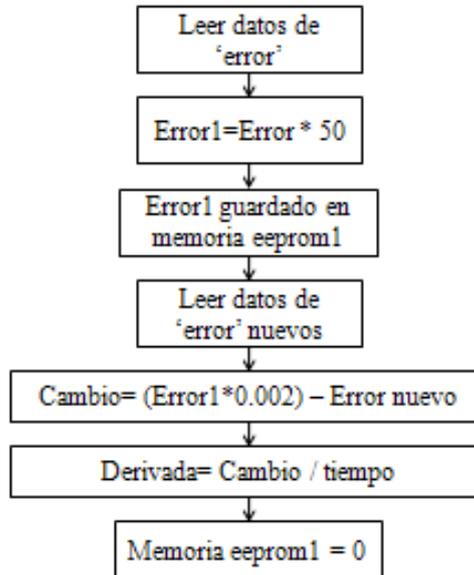


Figura 4.15: Diagrama de flujo para obtener la derivada del error.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.4.1. Membresía para los conjuntos de la Derivada del error.

Al igual que con el error se producen subprogramas en los que se asignan las funciones de la Tabla 4.2 a los rangos de valores que toma la derivada. Dichos valores de membresía se usan para evaluar las reglas diseñadas para determinar la acción de control más adecuada. La Tabla 4.2 muestra el nombre los casos utilizados para determinar estos valores.

Tabla 4.2

Casos programados de los conjuntos de Derivada del error con sus funciones.

Caso	Dominio	Función	Conjunto Involucrado
Caso 11	$x < -0,0625$	$y = 1$	Derivada "Negativa"
Caso 12	$-0,0302 > x > -0,0625$	$y = -22,02 x - 0,33$	Derivada "Negativa"
Caso 13	$-0,015 > x > -0,0302$	$y = -22,02 x - 0,33$ $y = 33,1125 x + 1$	Derivada "Negativa" Derivada "Cero"
Caso 14	$0 > x > -0,015$	$y = 33,1125 x + 1$	Derivada "Cero"
Caso 15	$x = 0$	$y = 1$	Derivada "Cero"
Caso 16	$0,003 > x > 0$	$y = -160 x + 1$	Derivada "Cero"
Caso 17	$0,00625 > x > 0,00312$	$y = -160 x + 1$ $y = 106,66 x - 0,33$	Derivada "Cero" Derivada "Positiva"
Caso 18	$0,012 > x > 0,00625$	$y = 106,66 x - 0,33$	Derivada "Positiva"
Caso 19	$x > 0,0125$	$y = 1$	Derivada "Positiva" Derivada "Positiva"

Nota: Los casos especificados son el nombre de cada subprograma y, para cada uno, la x representará la Derivada del Error y la variable y representará el valor de membresía para cada conjunto como una variable *float*. Elaborado por: Los Autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

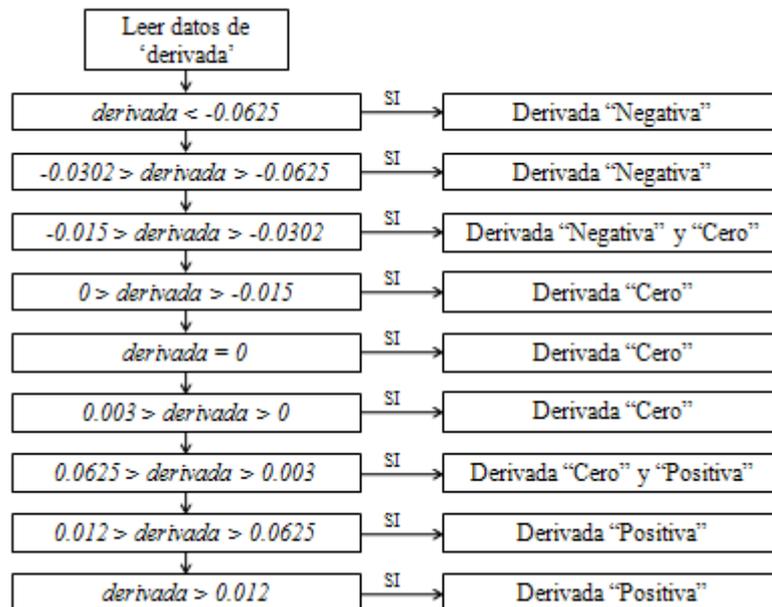


Figura 4.16: Diagrama de flujo de los casos de la derivada del error.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.5. Reglas y base del conocimiento.

Para programar la base de conocimiento es necesario recordar cuál será el valor al final de esta etapa. Lo entregado por esta parte será un valor fusificado que ocasionará una acción de control correspondiente a un valor del conjunto de salida.

La base del conocimiento toma las reglas diseñadas en capítulos anteriores de este proyecto para realizar una serie de operaciones y obtener una salida fusificada. Como primer punto compara los valores de membresía de cada uno de los conjuntos participantes de las reglas activas y utiliza el valor mínimo entre ellos. La Figura 4.17 muestra con mayor claridad el procedimiento a realizar en esta parte del controlador.

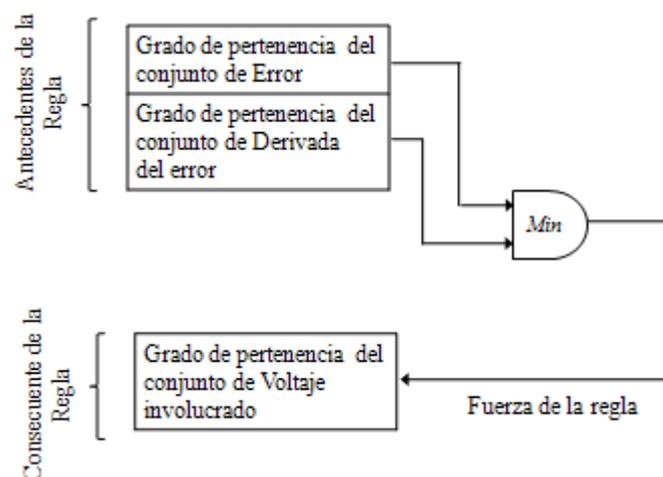


Figura 4.17: Diagrama de proceso de evaluación de funciones de membresía de cada regla.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

El grado de membresía resultante de cada regla es comparado con otros que afecten el mismo conjunto consecuente obteniendo al final el máximo entre estas cantidades. Este máximo será el grado de acción de cada conjunto de salida.

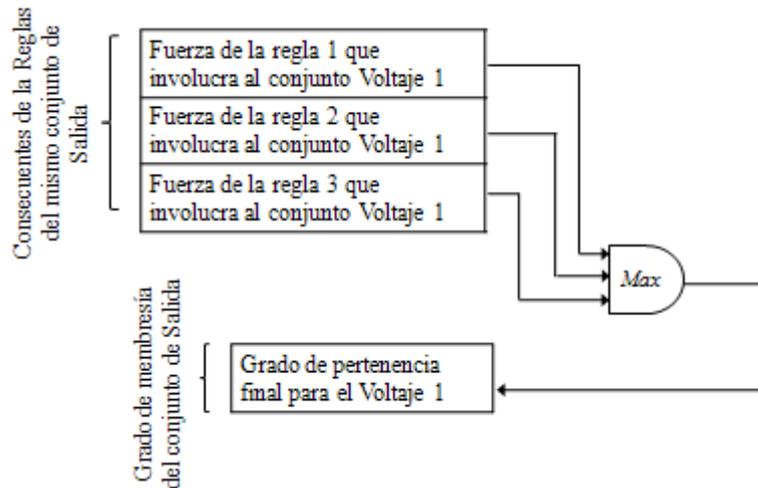


Figura 4.18: Diagrama de proceso de evaluación de los consecuentes de cada regla.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

La Figura 4.18 muestra el proceso de la operación máximo realizado entre los valores de membresía o fuerzas de cara regla correspondiente a un solo conjunto de salida. El resultado de esta operación será la salida fusificada del sistema para cada conjunto del universo de Voltaje.

4.2.5.1. Operación mínimo entre grados de pertenencia.

Para ingresar a las reglas se realiza un ciclo *if* que solo se activa cuando los grados de membresía de los conjuntos involucrados en el antecedente son mayores a cero. Dentro de este ciclo se realiza una comparación entre ambos valores de membresía para tomar solamente el menor de ellos. El mínimo se basa en una comparación entre dos valores cuyo resultado será el menor de ellos. En el controlador se realiza esta operación con la finalidad de reemplazar al conector y (*and*) utilizado entre los valores de membresía de los diferentes conjuntos del universo Error y Derivada del error de cada regla. El resultado de esta operación es recibido por una variable tipo *float*.

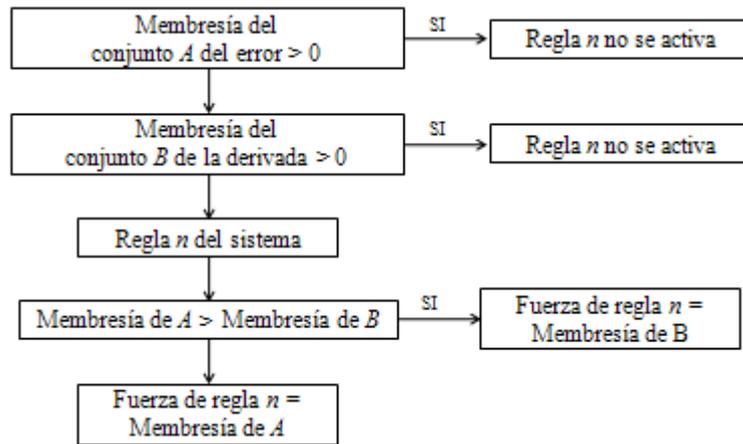


Figura 4.19: Diagrama de flujo para determinar el mínimo de cada regla.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

El diagrama de flujo de la Figura 4.19 funciona para todas las reglas del sistema en el que A y B son los conjuntos de las condiciones de cada regla y n es la regla activada por esta condición.

4.2.5.2. Operación máximo entre reglas.

El máximo se utiliza para determinar el valor mayor entre un grupo de cantidades. Su finalidad, en el controlador, es determinar el valor de pertenencia que será utilizado para establecer la acción de control ejercida por cada conjunto de salida. Para facilitar la implementación solo se comparan los valores de membresía de las reglas que tengan consecuentes comunes, es decir, se clasificarían en máximo entre reglas de Voltaje “Bajo”, máximo entre reglas de Voltaje “Medio” y máximo entre reglas de Voltaje “Alto”.

4.2.5.2.1. Máximo entre reglas de Voltaje “Bajo”.

Las reglas de control que tienen como consecuente el conjunto Voltaje “Bajo” son la regla 1, la regla 2, la regla 4 y la regla 5. Para poder saber el valor de membresía de Voltaje “Bajo” se encuentra el máximo entre estas reglas mencionadas

mediante la aplicación del algoritmo de la Figura 4.20. Las variables R1, R2, R4 y R5 corresponden a las fuerzas de las reglas 1, 2, 4 y 5 respectivamente.

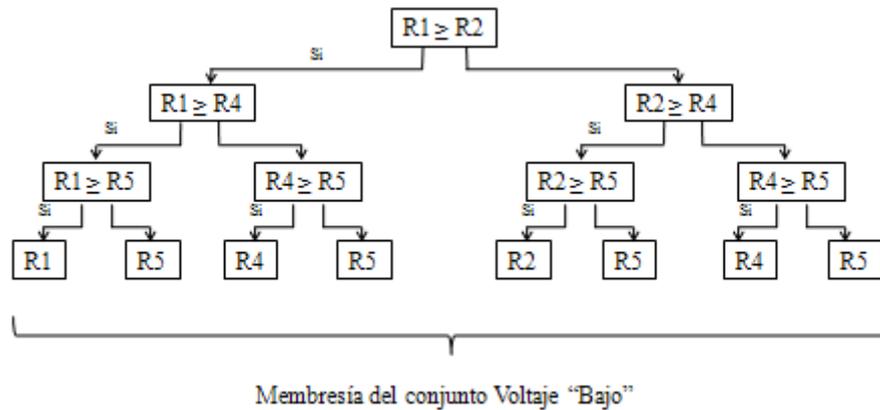


Figura 4.20: Diagrama de flujo del valor de membresía del conjunto Voltaje “Bajo”.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.5.2.2. Máximo entre reglas de Voltaje “Medio”.

Las reglas del sistema que tienen por consecuente el conjunto Voltaje “Medio” son la regla 3 y la regla 6. El operador máximo será utilizado entre ellas para establecer el valor de pertenencia correspondiente a este conjunto. El diagrama de flujo de la Figura 4.21 muestra la forma de aplicar este operador para las reglas usadas. Las variables R3 y R6 representan las reglas 3 y 6 respectivamente.

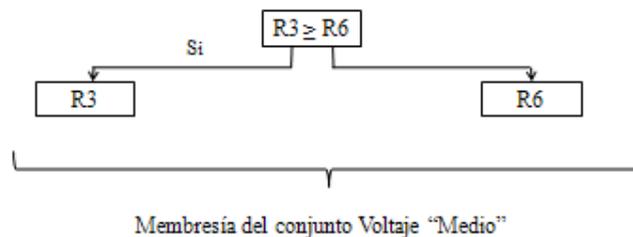


Figura 4.21: Diagrama del valor de membresía del conjunto Voltaje “Medio”.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.5.2.3. Máximo entre reglas de Voltaje “Alto”.

Las reglas del sistema involucran al conjunto de salida Voltaje “Alto” son la regla 7, la regla 8 y la regla 9. Al igual que en los demás casos se determina su acción mediante el máximo demostrado por el diagrama de flujo de la Figura 4.22

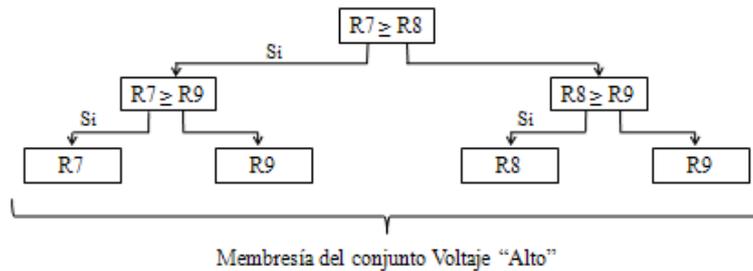


Figura 4.22: Diagrama del valor de membresía del conjunto Voltaje “Medio”.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.6. Defusificación y método del centroide.

Para obtener la salida total del sistema es necesario defusificar el valor obtenido de los procedimientos anteriores mediante el uso del método del centroide. Este método se resume de forma estructural a continuación en la Figura 4.23.

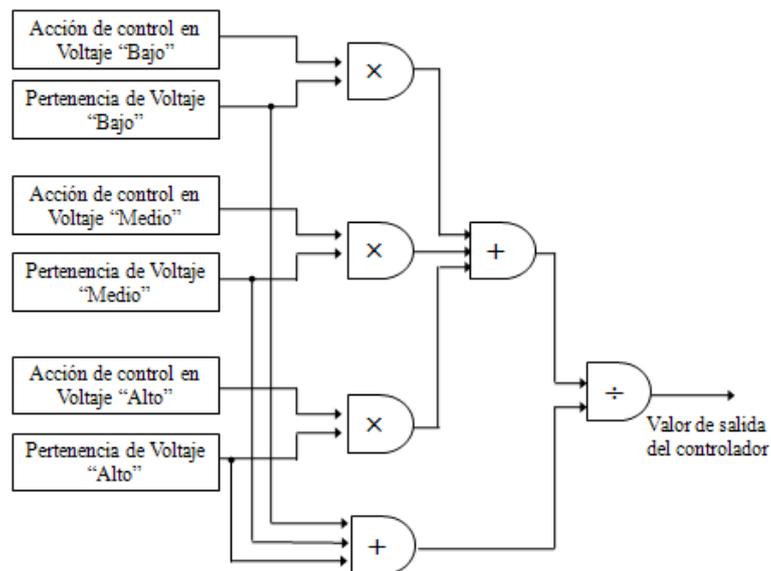


Figura 4.23: Diagrama de la estructura para defusificar la salida.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.6.1. Acción de control de los conjuntos de salida.

Para obtener la acción de control de cada conjunto de salida se debe despejar las variables dependientes por independientes en las funciones de pertenencia del universo de discurso de Voltaje. De esta manera, al ingresar un valor de y o de membresía, obtendremos un valor de x que corresponderá a un valor de voltaje para el rango en que esta función trabaje. La Tabla 4.3 muestra las funciones provenientes de realizar esta acción.

Tabla 4.3

Funciones de la variable Voltaje invertidas.

Conjunto del consecuente	Función de salida
Voltaje "Bajo"	$x = -0,2 y + 0,2$
Voltaje "Medio"	$x = 0,2 y + 2,3$ $x = -0,2 y + 2,7$
Voltaje "Alto"	$x = -0,2 y + 4,8$

Nota: Para el caso de Voltaje "Medio" se involucran dos casos debido a que este conjunto posee una forma triangular y su función cambia. La variable x representa el Voltaje resultante y la variable y simboliza el valor de pertenencia entrante. Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.2.7. Envío de señal PWM.

Para producir la señal PWM se genera una interrupción interna que permite utilizar los puertos C1 y C2 por donde salen este tipo de datos. Se prepara la señal mediante la división de la salida del puerto entre 2 para producir un ciclo de trabajo de 0 a 512 bits o del 50% y por último se setea la variable fusificada como salida del pin respectivo a través del comando `set_pwm1_duty (salida)`. Las PWM se caracterizan por entregar 1 y 0 lógicos que producen 5V o 0V respectivamente a una frecuencia alta que, al cargar parcialmente un capacitor, generan el mismo valor de la salida del controlador en voltios.

4.2.8. Ganancias del sistema.

Como se explicó en el capítulo del diseño, el controlador por sí solo no logra cubrir los requerimientos del sistema por lo que es necesario agregarle unas ganancias similares a las escogidas en la Tabla 4.5 como lo muestra la Figura 4.19.

Es importante destacar en este punto que, estas variables afectan directamente a la señal recibida por el controlador, por lo que, es necesario ser precavido de solo afectar la señal de Error sin modificar la señal que entra para ser derivada. No está demás considerar que las ganancias podrían diferir un poco respecto a los valores de la simulación debido a que en *Matlab* se usa una plataforma sin errores mientras que el módulo físico está expuesto a agentes externos que alteran su funcionamiento ideal. Para un mejor efecto de estos parámetros se recomienda que sean elegidos como último paso de la programación, observando su efecto en el comportamiento de la planta.

4.2.9. Interfaz de la LCD.

El objetivo de la interfaz realizada en la LCD es poder generar una pantalla que muestre todos los datos necesarios al usuario para que el mismo pueda dar una evaluación acertada acerca del funcionamiento del controlador.

Se diseñan tres pantallas para cumplir con este objetivo. La primera, una que muestra los datos de los autores y el nombre del controlador. Esta se programa para aparecer solo cuando se encienda el módulo y para desaparecer luego de un pequeño tiempo. La segunda es una pantalla que le dará la oportunidad al usuario de observar los cambios en la variable de salida en tiempo real. En esta se muestra el setpoint, el error, el estado actual de la planta, y la salida del controlador. La tercera es una pantalla en la que se detallan los grados de membresía que poseen cada conjunto del Error y de la Derivada del error La Figura 4.24, 4.25 y 4.26 muestran la simulación de la interfaz diseñada.

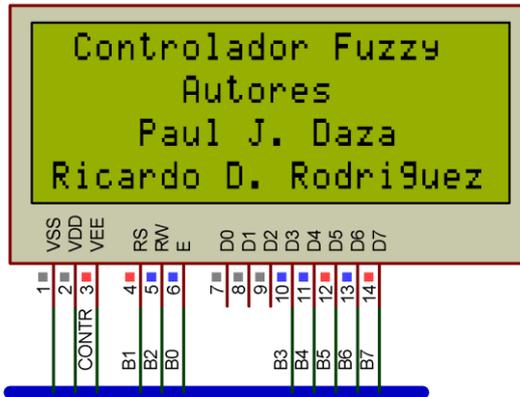


Figura 4.24: Interfaz inicial con los datos de los autores.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

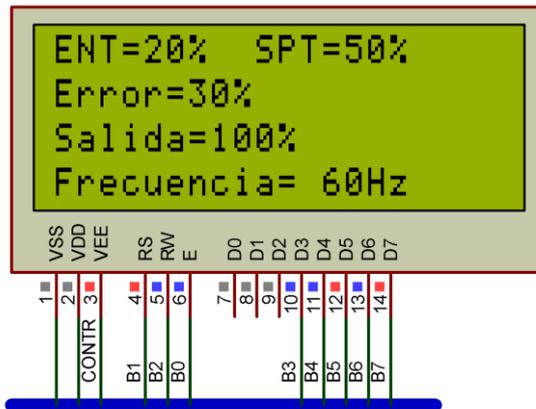


Figura 4.25: Interfaz principal con los datos del sistema.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

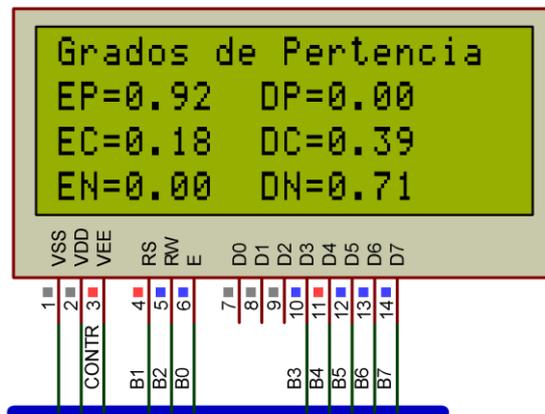


Figura 4.26: Interfaz secundaria con los grados de membresía de cada conjunto.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.3. Diseño de los diagramas PCB.

Para la elaboración de los circuitos en PCB utilizó un programa llamado *Eagle* que posee características electrónicas y le permite al usuario ubicar, de forma automática o manual, el trazado de las pistas de conexión entre los elementos de un circuito. Una de las pautas al momento de ubicar la PCB es volverla funcional por lo que se debe procurar ubicar las salidas en los extremos como en el caso de las señales PWM, salidas reguladas de voltaje, salidas de la pantalla, etc.

Se decide ubicar por separado el conjunto de botones para que el diseño final sea más funcional para el usuario. El resultado del diseño en pcb del circuito diseñado se muestra a continuación en las Figuras 4.27 y 4.28.

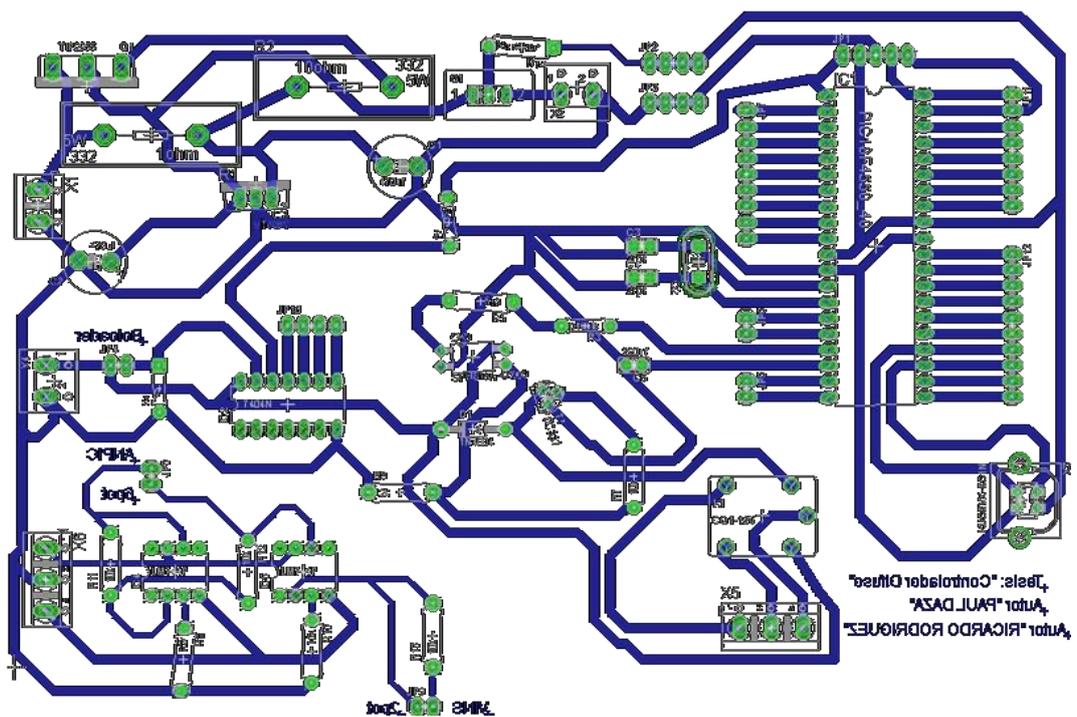


Figura 4.27: Diagrama PCB de tarjeta principal.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

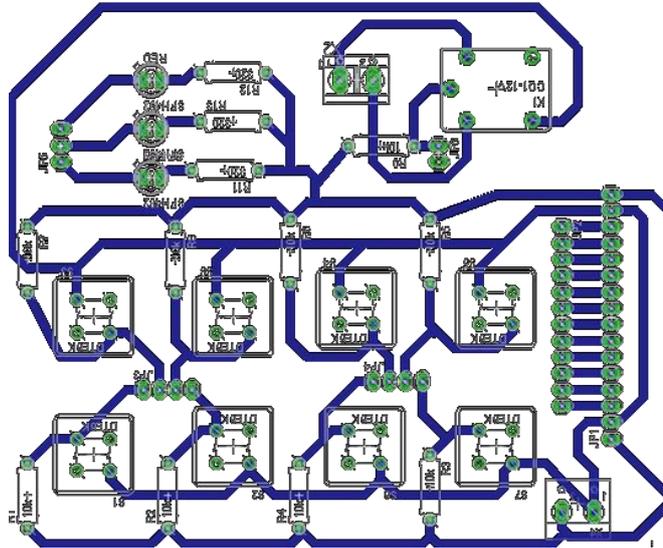


Figura 4.28: Diagrama PCB de los botones del módulo.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.4. Ensamblaje del módulo.

Para el ensamblaje del módulo simplemente se unen las tarjetas impresas basadas en el diseño PCB implementado dentro de una caja de acero forrada con un cuero fino para mejor su presentación. Manteniendo la utilidad del módulo se encaminará el armado del equipo de tal forma que los elementos que interactúan con el usuario queden en un punto y las salidas y entradas del módulo en el otro punto.



Figura 4.29: Módulo de control durante el ensamblaje.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

4.4.1. Entradas y salidas del módulo.

Las entradas estarán comprendidas por todas aquellas señales que el módulo recibirá para realizar el proceso de control. Se han designado dos puertos para la recepción de la señal emitida por los sensores que el usuario utilicen los cuales pueden ser de tipo digital o analógica. Para el caso de la planta de nivel, se utilizará la señal proveniente del sensor resistivo como señal analógica.

Entre las señales que pueden ser entregadas por el módulo se encuentran: la salida de control de tipo analógica, la PWM directa del microcontrolador y las PWM generadas usando las compuertas normalmente abierta y cerrada del relé. Entre los voltajes suministrados se encuentran 5V y el referente a tierra (GND). También se hacen uso de un conjunto de cables para otorgar 5V, 12V y GND desde la fuente central del circuito.



Figura 4.30: Entradas y salidas físicas del módulo de control.

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

En la Figura 4.30 se pueden observar los puertos de entrada y salida del módulo. La Tabla 4.4 muestra el orden de la asignación de cada una de estas borneras.

Tabla 4.4

Asignación de las tareas de los puertos de entrada y salida del módulo

Puertos	Tarea	Función
Puerto 1	GND	Salida
Puerto 2	5 Voltios DC	Salida
Puerto 3	Sensor analógico	Entrada
Puerto 4	Pin E0	Mixta
Puerto 5	PWM 2 del micro	Salida
Puerto 6	PWM del micro	Salida
Puerto 7	Relé NA	Salida
Puerto 8	Relé NC	Salida
Puerto 9	Pin A2	Mixta
Puerto 10	Pin A1	Mixta
Puerto 11	Tx de RS 232	Salida
Puerto 12	Rx de RS 232	Entrada

Nota: Los puertos son enumerados de izquierda a derecha. Es importante recalcar que, al ser un módulo didactico, la finalidad del mismo es realizar una las distintas tareas que el usuario desee por lo que se agregan funciones extra al módulo. Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

CAPITULO 5

COSTOS

5.1.Costos de diseño e implementación del módulo.

Para estimar el costo del módulo se consideran las horas invertidas en su diseño y construcción. Aproximadamente un ingeniero electrónico gana mensualmente \$800.00 lo que aproximadamente equivale a \$5.00/hora de trabajo.

En diseño de las bases matemáticas y electrónicas y su ensamblaje se invirtieron cerca de 5 días de trabajo, lo que equivale a una semana laboral o \$200.00 en representación monetaria lo que genera, incluidos materiales e impresión PCB, un gasto total de \$354.35. La Tabla 5.1 muestra la lista de materiales utilizados y el valor aproximado de inversión por todo el proyecto.

Tabla 5.1

Lista de costos del proyecto

Costos del proyecto			
Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
19	Resistencia de 10K	\$ 0,03	\$ 0,57
2	Resistencia de 5K	\$ 0,03	\$ 0,06
1	Resistencia de 2,2K	\$ 0,03	\$ 0,03
1	Resistencia de 1K	\$ 0,03	\$ 0,03
2	Resistencia de 270	\$ 0,03	\$ 0,06
1	Potenciometro de precisión5K	\$ 1,25	\$ 1,25
1	Potenciometro 47K	\$ 0,25	\$ 0,25
3	Potenciometro 1K	\$ 0,25	\$ 0,75
2	Capacitor de 470 uF	\$ 0,25	\$ 0,50
2	Capacitor de 27 pF	\$ 0,25	\$ 0,50
1	Capacitor de 10 uF	\$ 0,25	\$ 0,25
2	Capacitor de 0,1 uF	\$ 0,25	\$ 0,50
1	Capacitor de 0,01 uF	\$ 0,25	\$ 0,25
1	Diodo 1n4007	\$ 0,05	\$ 0,05
1	Relé a 24Voltios	\$ 0,25	\$ 0,25
1	Tip 2955	\$ 1,25	\$ 1,25
1	BC337	\$ 1,25	\$ 1,25
1	Cristal de cuarzo de 8MHz	\$ 1,00	\$ 1,00
2	Opam 741	\$ 0,25	\$ 0,50
1	Regulador 7805	\$ 0,25	\$ 0,25
1	PIC 18f4550	\$ 12,00	\$ 12,00
1	LCD 4x20	\$ 28,00	\$ 28,00
1	Pic Kit v2.0	\$ 25,00	\$ 25,00
1	Puerto USB tipo B	\$ 2,50	\$ 2,50
20	Cables macho y hembra	\$ 0,25	\$ 5,00
1	Fuente de computadora	\$ 10,00	\$ 10,00
1	Disipador de calor	\$ 0,50	\$ 0,50
5	Zocalos	\$ 0,20	\$ 1,00
2	Switchs	\$ 0,40	\$ 0,80
2	Impresión de PCB	\$ 30,00	\$ 60,00
1	Diseño y ensamblaje de un módulo	\$ 200,00	\$ 200,00
TOTAL			\$ 354,35

Nota: Los precios de estos artículos pueden variar o ser reducidos si los materiales son conseguidos a vendedores más económicos. Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

CAPITULO 6

RESULTADOS

6.1.Respuesta del sistema en el diseño de control.

En el diseño de control se logra una respuesta ideal. El overshoot, tiempo de subida y tiempo estabilización son comparados en la Tabla 6.1. La Figura 6.1 muestra las dos respuestas del sistema con controlador y sin controlador en lazo cerrado y es evidente la mejoría que posee la respuesta de la planta.

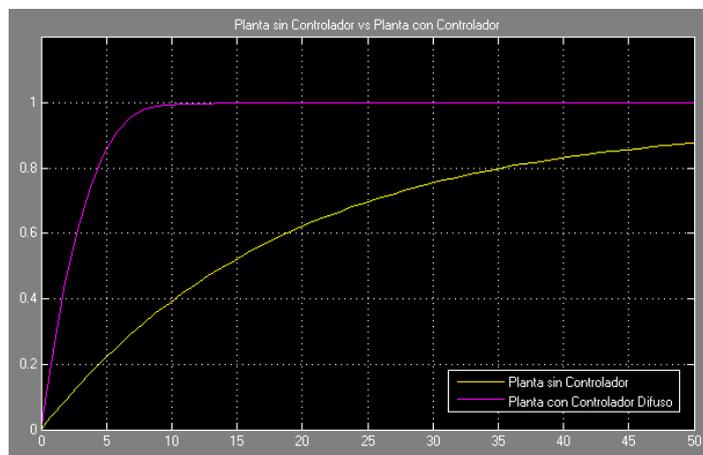


Figura 6.1: Comparación de respuesta del sistema con controlador vs sin controlador

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

Tabla 6.1

Parámetros de control de la planta con y sin controlador.

Parámetros de control	Planta sin controlador	Planta con controlador
Tiempo de subida (Error = 10%)	58,55 Seg	8,08 Seg
Tiempo de estabilidad (Error = 2%)	144,9 Seg	5,75 Seg
Error en estado estacionario	6,01%	0,0023%

Nota: La estimación de estos valores fue hecha en *Simulink* comparando su respuestas en el tiempo. Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

6.2. Respuesta del sistema en el diseño electrónico.

Respecto al diseño electrónico producido se determina que este cumplió su objetivo con éxito. Se logró el objetivo de producir una salida analógica entre 0 y 5 Voltios equivalente a la acción de control. Se programa el módulo para que su salida solo cambie a partir de 1 Voltio de error con el fin de que este realice una acción de control más fuerte. La Tabla 6.2 muestra el resultado de la salida respecto al Error generado con la señal de entrada cuando estos tienen al menos 1 V de diferencia.

Tabla 6.2

Respuesta del sistema respecto al error en Proteus.

Respuesta del módulo simulado	
Error	Salida (V)
1	4,88
0,9	4,1
0,8	4,1
0,7	4,1
0,6	3,91
0,5	3,32
0,4	2,73
0,3	2,24
0,2	1,07
0,1	0,48
0	0

Nota: No se agrega la derivada error debido a que su cambio es muy rápido y no es posible simular un cambio que reduce paulatinamente en el simulador. Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

6.3. Respuesta del módulo en la planta.

Para evaluar la respuesta del módulo en la planta se evalúa su funcionamiento de la misma forma en que se estudió la del módulo en *Proteus*. La Tabla 6.3 muestra la variación del error la cual es tomada cada 0.5V de cambio y se enlistan los valores arrojados por el sistema ante estas permutaciones.

Tabla 6.3

Respuesta del sistema respecto al error en la práctica.

Respuesta del módulo en la práctica	
Error	Salida (V)
1	4,65
0,9	3,95
0,8	3,88
0,7	3,15
0,6	3,17
0,5	2,99
0,4	2,6
0,3	1,97
0,2	1,61
0,1	0,5
0	0,01

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

Para determinar el funcionamiento real con relación al de la simulación se elabora la Tabla 6.4 en donde se detalla la diferencia entre ambas salidas en voltajes. Se puede evidenciar que su diferencia máxima es 0.95 V cuando el error es de 0.7 lo que es considerado tolerable; sin embargo, la respuesta del sistema puede ser afinada de forma más estrecha con respecto a la simulada alterando los valores el capacitor y la resistencia del diagrama proveniente de la salida PWM.

Tabla 6.4

Contraste de respuesta entre simulación y realidad de la salida del módulo

Contraste de la respuesta del módulo en la simulación con la respuesta en la práctica			
Error	Salida simulada (V)	Salida Real (V)	Diferencia
1	4,88	4,65	0,23
0,9	4,1	3,95	0,15
0,8	4,1	3,88	0,22
0,7	4,1	3,15	0,95
0,6	3,91	3,17	0,74
0,5	3,32	2,99	0,33
0,4	2,73	2,6	0,13
0,3	2,24	1,97	0,27
0,2	1,07	1,61	0,54
0,1	0,48	0,5	0,02
0	0	0,01	0,01

Nota: La diferencia equivale a la resta entre las dos salidas en valor absoluto. Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1.Conclusiones

Luego de la elaboración del presente trabajo de titulación previo al título de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo en el cual se desarrollo el estudio y el diseño de un módulo de control difuso basado en microcontroladores se pueden definir las siguientes conclusiones:

1. Se logró diseñar con éxito un módulo con fines didácticos en el que es posible realizar pruebas de control con distintas variables. Uno de los objetivos trazados para su desarrollo fue intentar darle versatilidad al equipo, característica que fue alcanzada al agregar diferentes tipos de entrada y salidas. El módulo cuenta con 1 entrada digital, 3 entradas mixtas (digitales o analógicas), 2 salidas PWM directas, 2 PWM indirectas desde un relé, 5 voltios DC y el referente a GND con las que el usuario puede ingresar una cantidad diversa de señales provenientes de sensores, procesarlas en el microcontrolador a través de las reglas difusas y luego entregar la señal de control de forma digital o analógica por medio de una de las salidas del módulo.

2. Con respecto a la construcción del proyecto se lograron emplear elementos de uso electrónico convencional como resistencias, capacitores y demás. El módulo centra su funcionamiento en un microcontrolador que recibe y envía las señales que el usuario programa en un compilador basado en lenguaje C. La finalidad de hacer uso de estos elementos poco robustos es darle, a los estudiantes de Control y Automatismo la oportunidad de conocer una implementación distinta al PLC, objetivo que pudo ser evidenciado por medio del correcto funcionamiento del módulo para controlar el proceso seleccionado. Generalmente se tiende a pensar que esta electrónica de uso común no es tan eficiente en la industria sin embargo, se

determina que es posible hacer uso de los mismos siempre y cuando se divida de forma correcta las señales de electrónica de potencia y las de control.

3. En relación al funcionamiento del controlador difuso se concluye que su operación es adecuada debido a los resultados obtenidos en las pruebas con la planta de nivel. Se optimizó con éxito la frecuencia de operación de la bomba para que esta solo realice el llenado del tanque hasta un setpoint y, una vez alcanzado, lo mantenga con el mínimo esfuerzo requerido, evitando así el desgaste del equipo por trabajo innecesario.

4. En la comparación de los resultados obtenidos en la simulación y en la práctica las diferencias son muy marcadas debido a la manera ideal de trabajar que poseen las plataformas de simulación en la computadora. Sin embargo, se concluye que el trabajo realizado logró una diferencia aceptable en la acción de control entregada por el módulo considerando la dificultad de implementación que presentó el sistema.

5. Respecto al funcionamiento del sistema manejado por el controlador difuso frente al PID se concluye que el sistema con el controlador difuso es superior en todo aspecto. La respuesta del sistema con el controlador difuso fue 10 segundos más rápida y se logró reducir a menos del 1% el overshoot del sistema. Estos resultados fueron estimados en las plataformas de simulación y no en la práctica debido a que en el sistema real a la planta le toma más de un segundo en llegar de un punto del setpoint a otro a causa de las limitaciones de fábrica que posee la bomba lo que hace imposible determinar diferencias de estabilidad.

6. Respecto a la relación con el usuario se elabora un manual en el que se detallan los pasos a seguir para mantener una correcta actividad del módulo de control y se describe el procedimiento para lograr reprogramarlo con el fin de controlar otras variables. Se puede concluir que este módulo elaborado es de utilidad no solo para el estudio del control de procesos sino también para el de otras áreas

donde un microcontrolador puede ser utilizado. Su uso está solo limitado por el ingenio de su usuario.

7.2.Recomendaciones.

En relación al diseño se recomienda a los futuros realizadores de temas similares efectuar simulaciones acerca de todos los casos posibles de su tema de estudio. No efectuar un diseño adecuado podría incurrir en cambios estructurales de la implementación en etapas finales del proceso lo que alargaría el periodo de entrega. Un diseño adecuado asegura una implementación exitosa y poco problemática.

Se recomienda también trazar un cronograma de trabajo al principio del proceso de desarrollo de un proyecto. Elaborar un calendario con fechas exactas de cumplimiento promueve el trabajo de forma positiva, da una mejor idea del alcance real de una tarea y ayuda a organizar las actividades a realizar.

Con relación al funcionamiento del módulo de control se sugiere realizar prácticas de manera controlada y siguiendo las instrucciones del manual detallado en anexos. El módulo tiene un tiempo de reacción ante los valores del setpoint inmediata pero su fuerza de control variable dirigida al variador de frecuencias puede incurrir en daños en este equipo y en la bomba. Se recuerda además que la bomba es un actuador que necesita ser cebado por su punto de salida y este es una tarea que debe ser efectuada antes de empezar una práctica con este módulo.

Se invita a los docentes de Control y Automatismo y de otras áreas de ingeniería a incentivar a los estudiantes a realizar mayor cantidad de proyectos de este tipo. Los trabajos de titulación de este tipo se caracterizan por otorgar a los estudiantes la oportunidad de integrar distintos campos del conocimiento que han adquirido durante su periodo de estudio. Cabe recalcar además que al finalizar el trabajo se realizaría la entrega formal de un módulo que servirá de apoyo para los estudiantes que deseen ampliar su conocimiento en estas áreas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agama, A. (2015). *Implementación de control de velocidad de un motor DC con controlador PID convencional y Fuzzy P-PI-PID con diferentes tipos de entradas utilizando software LabView*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica de Litoral.

Ambalal, P. (2004). Transformation Functions for Trapezoidal Membership. *International Journal of Computational Cognition* , 115-135.

Ampuño, G., Agila, W., & Cevallos, H. (2014). *Implementación y análisis de rendimiento de un control industrial de nivel para tanques con fluidos, basado en lógica difusa*.

Antsaklis, P., & Passino, K. (1993). *An Introduction to Intelligent and Autonomous Control*. Kluwer Academic Publishers.

Benito, T., & Durán, I. (2011). *Lógica Borrosa*. Madrid: Universidad Carlos III.

Criollo, E. (2015). *Diseño e implementación de un control difuso tolerante a falla, aplicado al control de nivel de un líquido*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca.

Dávila, A. (2013). *Diseño y construcción de un control difuso de lazo cerrado de temperatura mediante el microcontrolador 18f452 para los laboratorios de teoría de control de la Universidad Politécnica Salesiana*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana de Quito.

Garay, L. (s.f.). *UPIITA-IPN*. Obtenido de http://www.ingenieria.upiita.ipn.mx/attachments/229_Inferencia%20difusa%20II.pdf

Gómez, J. (2008). *Fuzzy Control*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional-FRBA.

Holguín, J. (2007). *Estrategias avanzadas para el control de un sistema MIMO de 2 rotores*. Universidad de Chile.

Jantzen, J. (1998). *Tuning Of Fuzzy PID Controllers*. Technical University of Denmark.

Kioskea. (2014). *USB (Bus de serie universal)*.

Kuoro, S., & Musalem, R. (2002). *Control Mediante Lógica Difusa*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Méndez, D. (2014). *Diseño e Implementación de Sistema de Control de Nivel y Temperatura de Tanque de Agua para Prácticas en la Materia de Control de Procesos*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Microchip Technology Inc. (2006). *PIC18F2455/2550/4455/4550 Datasheet*.

Olmo, M. (2008). *Tutorial de Introducción de Lógica Borrosa*. Obtenido de DMATIC:

http://www.dma.fi.upm.es/recursos/aplicaciones/logica_borrosa/web/tutorial_fuzzy/contenido3.html

Ortiz, J. (2013). Control difuso adaptativo para un mecanismo no lineal de helicóptero. *INGENIUS n°10*, 5-11.

Pantoja, W. (2013). *Análisis y comparación de sistemas de control PID y PID difuso en lógica reconfigurable*. . Oaxaca: Universidad del Istmo.

Passino, K., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison- Wesley .

Ponce, P. (2010). *Inteligencia Artificial con Aplicaciones en la Ingeniería*. Alfaomega Grupo Editor.

Ramírez, S., Lázaro, I., & Anzures, J. (2008). *Diseño de un sistema de control lógico difuso basado en microcontroladores de 8 bits*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Sanchez, J., & Barrera, W. (2015). *Diseño de controladores PID difusos de las variables de nivel y temperatura de una plataforma de entrenamiento para control de procesos continuos*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana de Quito.

Sugeno, M. (1985). *An Introductory Survey of Fuzzy Control*. Elsevier Inc.

UDEP. (s.f.). *Bibliocentral*. Obtenido de http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf

Ying, H. (1993). The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains. *Automatica* , 1579-1589.

ANEXOS

Anexo 1: Manual de usuario.



MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO FUZZY LOGIC

El Modulo Fuzzy Logic o de Control Difuso es una plataforma de hardware para evaluar los algoritmos que se utilizan en la lógica difusa con el micro controlador 18F4550. El Kit posee una gran gama de características que facilita al usuario conectarlo, reprogramarlo y aumentar sus funciones.

Hardware

- Micro controlador (PIC18f4550)
- Pantalla LCD(4x20)
- Reloj de 8MHZ
- Sensor Analógico (Setpoint)
- Sensor analógico (Pruebas)
- Potenciómetro para contraste de la pantalla
- 8 pulsadores conectado directamente a los pines (C0, NC, A4, A5, E2, NC, E0, NC)
- Puerto D del microcontrolador libre
- Puerto USB (Conectado para escalabilidad)
- Fuente regula de 5 voltios
- Regulador de voltaje para sensor analógico
- Selector de dos posiciones
- Circuito Optoacoplador para PWM
- Fuente de voltaje de (+5,+12,-12,GND)
- Switch frontal para bootloader
- Switch trasero (switch de corte de energía)
- Alimentación de entrada AC
- Ventilación
- Conectores traseros para sensor y voltajes
- Salida de voltajes

Descripción de los elementos

Micro controlador (PIC18f4550)

Es el gobernante del módulo encargado de procesar las entradas y salidas del dispositivos y realizar los algoritmos de la lógica fuzzy

Pantalla LCD (4x20)

Encargado de mostrar el valor de las variables en estado real.

Sensor analógico (Setpoint)

Potenciómetro por el cual se maneja la señal deseada expresada en porcentaje (0-100%) (PIN_NA1)

Sensor Prueba

Potenciómetro por el cual se puede hacer pruebas en el dispositivo sin estar conectada a la planta, suplanta temporalmente el sensor analógico expresada en porcentaje (0-100%) (PIN_NA1)

Potenciómetro de contraste

Encargado de variar el contraste de la pantalla LCD del dispositivo

Circuito Optoacoplador para PWM

Por la corriente suministro por cada puerto del micro y limitada por la corriente máxima por pines provocaría que al conectar al variador la corriente disminuyera ocasionando una caída de tensión al circuito RC y para evitarlo, se conecta un circuito acoplador con relé que evita caída de tensión al aumentar.

8 pulsadores conectados directamente a los pines (C0, NC, A4, A5, E2, E0, NC, NC)

De superior de izquierda a derecha (PIN_C0, NC, PIN_A4, PIN_A5)

De inferior de izquierda a derecha (PIN_E2, NC, PIN_E0, NC)

Puerto D del microcontrolador Libre

Pines libres para futuros escalamientos al modulo

Puerto USB (Conectado para estabilidad)

Conectado y habilitado el USB para futuro escalamiento y bootloader.

Reloj

Tiene un reloj de cuarzo de 8MHz fijo

Conectores traseros para sensor

- ✓ Botonera
- ✓ Conectores traseros para sensor
- ✓ Pines de izquierda a derecha
- ✓ Puerto 1 RX
- ✓ Puerto 2 TX
- ✓ Puerto 3 Trigger
- ✓ Puerto 4 Echo
- ✓ Puerto 5 Relé1 (Punto 1) (Salida PW1)
- ✓ Puerto 6 Relé NC
- ✓ Puerto 7 Relé NA
- ✓ Puerto 8 Salida PWM2
- ✓ Puerto 9 PINE1
- ✓ Puerto 10 In Analógico
- ✓ Puerta 11 5v
- ✓ Puerto 12 GND

Regulador de voltaje para sensor analógico

El modulo cuenta con un regulador hasta 12 voltios que convierte de 0 a 5 variándolo con un potenciómetro que se encuentra ubicado al lado izquierdo del módulo (ajustable) introduciendo un desarmador para que no pueda ser manipulado con facilidad por seguridad.

Nota: se recomienda desconectar el cable interno del PIC en la posición AN0 físicamente (el primer pin superior de la placa junto al microcontrolador) e introducir la patita positiva del multímetro y la otra a Gnd, conectar el sensor y calibrar su valor al máximo y verificar que el multímetro marque 5voltios máximos y 0 voltios mínimo para evitar daños al microcontrolador. Una vez calibrado volver a conectar el cable.

Otra manera de calibrarlo es poner el potenciómetro al mínimo valor y cargar una programación analógica con valores de 0 a 1023 en la posición AN0 que se presente en la pantalla LCD colocar el sensor analógico a su máximo valor e ir graduando el potenciómetro hasta que este marque 1023

Ventilación

Cuenta con un ventilador de 0.3A a 12V para enfriamiento del dispositivo

Selector

Cambia el sensor de prueba por la entrada del sensor analógico

Suministro de energía

Fuente interna (+12, -12, +5, GND)

Tiene una fuente interna que suministra (+12,-12,+5, GND) con un amperaje máximo de:

+12V máximo 30 A

-12V Máximo 3A

+5 Máximo 20A

GND

Fuente de 5 voltios

Tiene una fuente de emergencia de 5 voltios en caso de fallar la fuente principal
+5 máximo 3A

Selección de Fuente

El cambio se lo hace internamente para mayor seguridad, con un switch interno.

Programación del Modulo

Se puede cambiar los valores de pertenencia cambiando los valores que se encuentran en

//Ecuaciones de pertenencia =>

```
if ((error <= -5) && (error >=-3))
{
  caso1();
}
elseif ((error >= a) && (error <=b))
{
  caso2();
}
```

Cambiar solo los valores de a y b que usted considere

Nota: También se puede cambiar la programación manteniendo los estándares de conexión del módulo y guiándose por la estructura de programación de la tesis.

Puertos del micro controlador

Puerto A	
A1-An0	Sensor analógico
A2-AN1	Setpoint
A3-An2	Prueba
A4	Pulsador
A5	Pulsador
A6 - ocs2	Reloj (P2)
Os1	Reloj (P1)

Tabla 1 Puertos A

*P2 y P1 Terminales del reloj 8MHZ

Puerto B	
B0	LCD (E)
B1	LCD (RS)
B2	LCD(RW)
B3	Libre
B4	LCD(B4)
B5	LCD(B5)
B6	LCD(B6)
B7	LCD(B7)

Tabla2 Puerto B

Puerto C	
C0	Pulsador Ext.
C1-CCP2	PWM2
C2-CCP1	PWM1
C3	No Existe
C4	USB(-)
C5	USB(+)
C6	TX
C7	RX

Tabla3 Puerto C

Puerto D	
D0	Libre
D1	Libre
D2	Libre
D3	Libre
D4	Libre
D5	Libre
D6	Libre
D7	Libre

Tabla 4 Puerto D

Puerto E	
E0	Pulsador
E1	Puerto T. 9
E2	Pulsador
E3	Bootloader
E4	No existe
E5	No existe
E6	No existe
E7	No existe

Tabla5 puerto E

Diagramas:

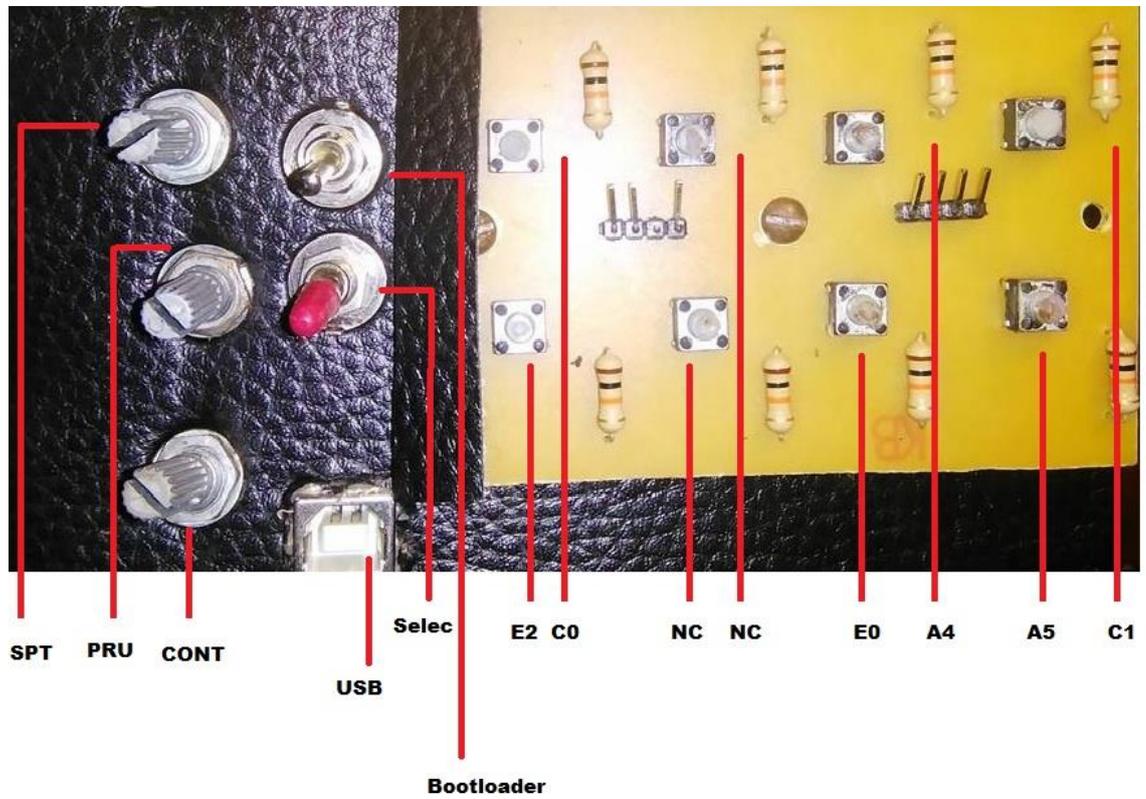


Figura 1.- Modulo Parte Frontal.

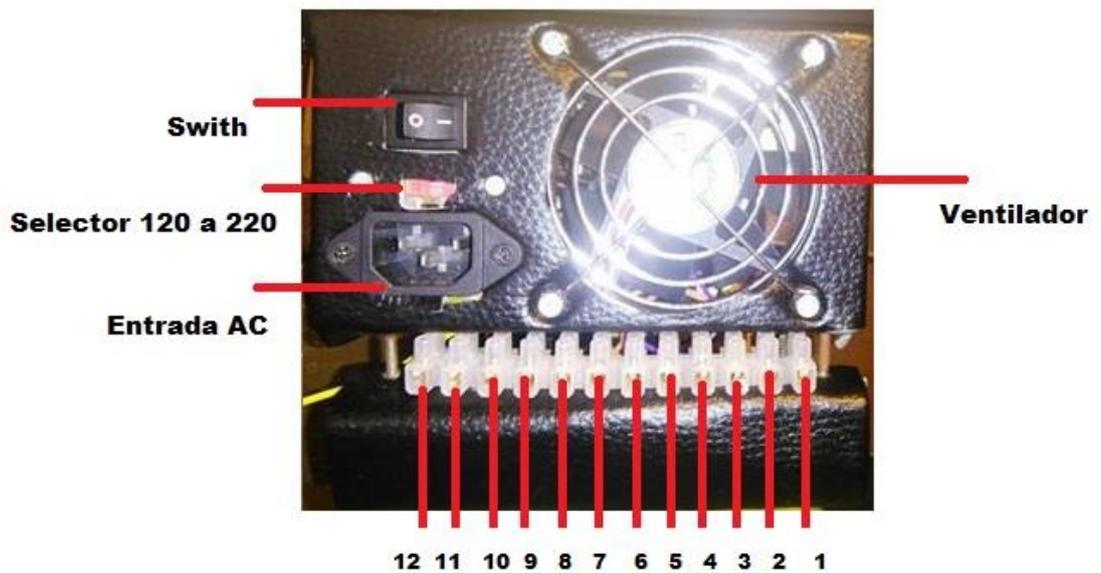


Figura2.- Modulo Parte posterior.

Anexo 2: Datasheet microcontrolador 18f4550.



PIC18F2455/2550/4455/4550
Data Sheet

28/40/44-Pin, High-Performance,
Enhanced Flash, USB Microcontrollers
with nanoWatt Technology

Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>



MICROCHIP PIC18F2455/2550/4455/4550

28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nanoWatt Technology

Universal Serial Bus Features:

- USB V2.0 Compliant
- Low Speed (1.5 Mb/s) and Full Speed (12 Mb/s)
- Supports Control, Interrupt, Isochronous and Bulk Transfers
- Supports up to 32 Endpoints (16 bidirectional)
- 1-Kbyte Dual Access RAM for USB
- On-Chip USB Transceiver with On-Chip Voltage Regulator
- Interface for Off-Chip USB Transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only)

Power-Managed Modes:

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 μ A typical
- Sleep mode currents down to 0.1 μ A typical
- Timer1 Oscillator: 1.1 μ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1 μ A typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes, including High Precision PLL for USB
- Two External Clock modes, up to 48 MHz
- Internal Oscillator Block:
 - 8 user-selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
 - User-tunable to compensate for frequency drift
- Secondary Oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Dual Oscillator options allow microcontroller and USB module to run at different clock speeds
- Fail-Safe Clock Monitor:
 - Allows for safe shutdown if any clock stops

Peripheral Highlights:

- High-Current Sink/Source: 25 mA/25 mA
- Three External Interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 5.2 ns (TCY/16)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 83.3 ns (TCY)
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
 - Multiple output modes
 - Selectable polarity
 - Programmable dead time
 - Auto-shutdown and auto-restart
- Enhanced USART module:
 - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave modes
- 10-bit, up to 13-channel Analog-to-Digital Converter module (A/D) with Programmable Acquisition Time
- Dual Analog Comparators with Input Multiplexing

Special Microcontroller Features:

- C Compiler Optimized Architecture with optional Extended Instruction Set
- 100,000 Erase/Write Cycle Enhanced Flash Program Memory typical
- 1,000,000 Erase/Write Cycle Data EEPROM Memory typical
- Flash/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-Programmable under Software Control
- Priority Levels for Interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Optional dedicated ICD/ICSP port (44-pin devices only)
- Wide Operating Voltage Range (2.0V to 5.5V)

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-BIT A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EA/USART	Comparators	Timers 8/16-BIT
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I ² C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

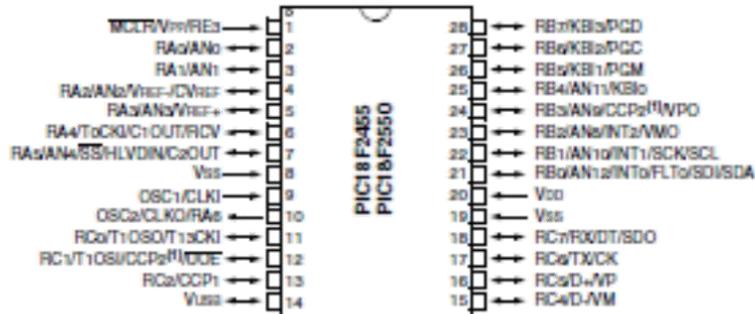
Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

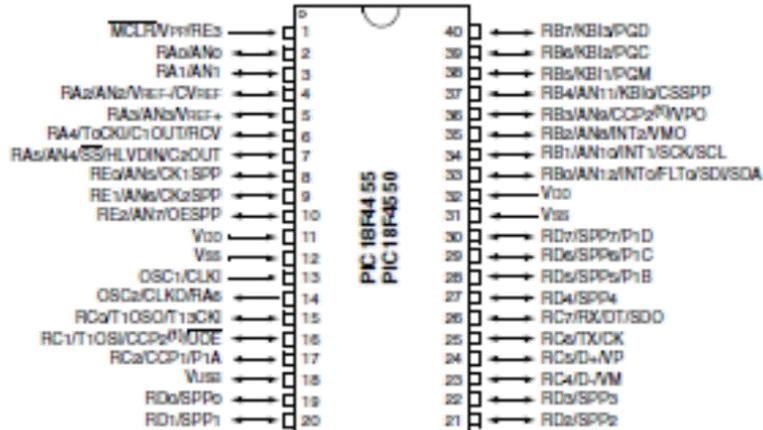
PIC18F2455/2550/4455/4550

Pin Diagrams

28-Pin PDIP, SOIC



40-Pin PDIP



Note 1: RB3 is the alternate pin for CCP2 multiplexing.

Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

PIC18F2455/2550/4455/4550

1.0 DEVICE OVERVIEW

This document contains device-specific information for the following devices:

- PIC18F2455
- PIC18F2550
- PIC18F4455
- PIC18F4550
- PIC18LF2455
- PIC18LF2550
- PIC18LF4455
- PIC18LF4550

This family of devices offers the advantages of all PIC18 microcontrollers – namely, high computational performance at an economical price – with the addition of high endurance, Enhanced Flash program memory. In addition to these features, the PIC18F2455/2550/4455/4550 family introduces design enhancements that make these microcontrollers a logical choice for many high-performance, power sensitive applications.

1.1 New Core Features

1.1.1 nanoWatt TECHNOLOGY

All of the devices in the PIC18F2455/2550/4455/4550 family incorporate a range of features that can significantly reduce power consumption during operation. Key items include:

- **Alternate Run Modes:** By clocking the controller from the Timer1 source or the internal oscillator block, power consumption during code execution can be reduced by as much as 90%.
- **Multiple Idle Modes:** The controller can also run with its CPU core disabled but the peripherals still active. In these states, power consumption can be reduced even further, to as little as 4% of normal operation requirements.
- **On-the-Fly Mode Switching:** The power-managed modes are invoked by user code during operation, allowing the user to incorporate power-saving ideas into their application's software design.
- **Low Consumption in Key Modules:** The power requirements for both Timer1 and the Watchdog Timer are minimized. See Section 28.0 "Electrical Characteristics" for values.

1.1.2 UNIVERSAL SERIAL BUS (USB)

Devices in the PIC18F2455/2550/4455/4550 family incorporate a fully featured Universal Serial Bus communications module that is compliant with the USB Specification Revision 2.0. The module supports both low-speed and full-speed communication for all supported data transfer types. It also incorporates its own on-chip transceiver and 3.3V regulator and supports the use of external transceivers and voltage regulators.

1.1.3 MULTIPLE OSCILLATOR OPTIONS AND FEATURES

All of the devices in the PIC18F2455/2550/4455/4550 family offer twelve different oscillator options, allowing users a wide range of choices in developing application hardware. These include:

- Four Crystal modes using crystals or ceramic resonators.
- Four External Clock modes, offering the option of using two pins (oscillator input and a divide-by-4 clock output) or one pin (oscillator input, with the second pin reassigned as general I/O).
- An internal oscillator block which provides an 8 MHz clock ($\pm 2\%$ accuracy) and an INTRC source (approximately 31 kHz, stable over temperature and VDD), as well as a range of 6 user-selectable clock frequencies, between 125 kHz to 4 MHz, for a total of 8 clock frequencies. This option frees an oscillator pin for use as an additional general purpose I/O.
- A Phase Lock Loop (PLL) frequency multiplier, available to both the High-Speed Crystal and External Oscillator modes, which allows a wide range of clock speeds from 4 MHz to 48 MHz.
- Asynchronous dual clock operation, allowing the USB module to run from a high-frequency oscillator while the rest of the microcontroller is clocked from an internal low-power oscillator.

Besides its availability as a clock source, the internal oscillator block provides a stable reference source that gives the family additional features for robust operation:

- **Fail-Safe Clock Monitor:** This option constantly monitors the main clock source against a reference signal provided by the internal oscillator. If a clock failure occurs, the controller is switched to the internal oscillator block, allowing for continued low-speed operation or a safe application shutdown.
- **Two-Speed Start-up:** This option allows the internal oscillator to serve as the clock source from Power-on Reset, or wake-up from Sleep mode, until the primary clock source is available.

Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

PIC18F2455/2550/4455/4550

1.0 DEVICE OVERVIEW

This document contains device-specific information for the following devices:

- PIC18F2455
- PIC18F2550
- PIC18F4455
- PIC18F4550
- PIC18LF2455
- PIC18LF2550
- PIC18LF4455
- PIC18LF4550

This family of devices offers the advantages of all PIC18 microcontrollers – namely, high computational performance at an economical price – with the addition of high endurance, Enhanced Flash program memory. In addition to these features, the PIC18F2455/2550/4455/4550 family introduces design enhancements that make these microcontrollers a logical choice for many high-performance, power sensitive applications.

1.1 New Core Features

1.1.1 nanoWatt TECHNOLOGY

All of the devices in the PIC18F2455/2550/4455/4550 family incorporate a range of features that can significantly reduce power consumption during operation. Key items include:

- **Alternate Run Modes:** By clocking the controller from the Timer1 source or the internal oscillator block, power consumption during code execution can be reduced by as much as 90%.
- **Multiple Idle Modes:** The controller can also run with its CPU core disabled but the peripherals still active. In these states, power consumption can be reduced even further, to as little as 4% of normal operation requirements.
- **On-the-Fly Mode Switching:** The power-managed modes are invoked by user code during operation, allowing the user to incorporate power-saving ideas into their application's software design.
- **Low Consumption in Key Modules:** The power requirements for both Timer1 and the Watchdog Timer are minimized. See Section 28.0 "Electrical Characteristics" for values.

1.1.2 UNIVERSAL SERIAL BUS (USB)

Devices in the PIC18F2455/2550/4455/4550 family incorporate a fully featured Universal Serial Bus communications module that is compliant with the USB Specification Revision 2.0. The module supports both low-speed and full-speed communication for all supported data transfer types. It also incorporates its own on-chip transceiver and 3.3V regulator and supports the use of external transceivers and voltage regulators.

1.1.3 MULTIPLE OSCILLATOR OPTIONS AND FEATURES

All of the devices in the PIC18F2455/2550/4455/4550 family offer twelve different oscillator options, allowing users a wide range of choices in developing application hardware. These include:

- Four Crystal modes using crystals or ceramic resonators.
- Four External Clock modes, offering the option of using two pins (oscillator input and a divide-by-4 clock output) or one pin (oscillator input, with the second pin reassigned as general I/O).
- An internal oscillator block which provides an 8 MHz clock ($\pm 2\%$ accuracy) and an INTRC source (approximately 31 kHz, stable over temperature and VDD), as well as a range of 6 user-selectable clock frequencies, between 125 kHz to 4 MHz, for a total of 8 clock frequencies. This option frees an oscillator pin for use as an additional general purpose I/O.
- A Phase Lock Loop (PLL) frequency multiplier, available to both the High-Speed Crystal and External Oscillator modes, which allows a wide range of clock speeds from 4 MHz to 48 MHz.
- Asynchronous dual clock operation, allowing the USB module to run from a high-frequency oscillator while the rest of the microcontroller is clocked from an internal low-power oscillator.

Besides its availability as a clock source, the internal oscillator block provides a stable reference source that gives the family additional features for robust operation:

- **Fail-Safe Clock Monitor:** This option constantly monitors the main clock source against a reference signal provided by the internal oscillator. If a clock failure occurs, the controller is switched to the internal oscillator block, allowing for continued low-speed operation or a safe application shutdown.
- **Two-Speed Start-up:** This option allows the internal oscillator to serve as the clock source from Power-on Reset, or wake-up from Sleep mode, until the primary clock source is available.

Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

PIC18F2455/2550/4455/4550

1.0 DEVICE OVERVIEW

This document contains device-specific information for the following devices:

- PIC18F2455
- PIC18F2550
- PIC18F4455
- PIC18F4550
- PIC18LF2455
- PIC18LF2550
- PIC18LF4455
- PIC18LF4550

This family of devices offers the advantages of all PIC18 microcontrollers – namely, high computational performance at an economical price – with the addition of high endurance, Enhanced Flash program memory. In addition to these features, the PIC18F2455/2550/4455/4550 family introduces design enhancements that make these microcontrollers a logical choice for many high-performance, power sensitive applications.

1.1 New Core Features

1.1.1 nanoWatt TECHNOLOGY

All of the devices in the PIC18F2455/2550/4455/4550 family incorporate a range of features that can significantly reduce power consumption during operation. Key items include:

- **Alternate Run Modes:** By clocking the controller from the Timer1 source or the internal oscillator block, power consumption during code execution can be reduced by as much as 90%.
- **Multiple Idle Modes:** The controller can also run with its CPU core disabled but the peripherals still active. In these states, power consumption can be reduced even further, to as little as 4% of normal operation requirements.
- **On-the-Fly Mode Switching:** The power-managed modes are invoked by user code during operation, allowing the user to incorporate power-saving ideas into their application's software design.
- **Low Consumption in Key Modules:** The power requirements for both Timer1 and the Watchdog Timer are minimized. See Section 28.0 "Electrical Characteristics" for values.

1.1.2 UNIVERSAL SERIAL BUS (USB)

Devices in the PIC18F2455/2550/4455/4550 family incorporate a fully featured Universal Serial Bus communications module that is compliant with the USB Specification Revision 2.0. The module supports both low-speed and full-speed communication for all supported data transfer types. It also incorporates its own on-chip transceiver and 3.3V regulator and supports the use of external transceivers and voltage regulators.

1.1.3 MULTIPLE OSCILLATOR OPTIONS AND FEATURES

All of the devices in the PIC18F2455/2550/4455/4550 family offer twelve different oscillator options, allowing users a wide range of choices in developing application hardware. These include:

- Four Crystal modes using crystals or ceramic resonators.
- Four External Clock modes, offering the option of using two pins (oscillator input and a divide-by-4 clock output) or one pin (oscillator input, with the second pin reassigned as general I/O).
- An internal oscillator block which provides an 8 MHz clock ($\pm 2\%$ accuracy) and an INTRC source (approximately 31 kHz, stable over temperature and VDD), as well as a range of 6 user-selectable clock frequencies, between 125 kHz to 4 MHz, for a total of 8 clock frequencies. This option frees an oscillator pin for use as an additional general purpose I/O.
- A Phase Lock Loop (PLL) frequency multiplier, available to both the High-Speed Crystal and External Oscillator modes, which allows a wide range of clock speeds from 4 MHz to 48 MHz.
- Asynchronous dual clock operation, allowing the USB module to run from a high-frequency oscillator while the rest of the microcontroller is clocked from an internal low-power oscillator.

Besides its availability as a clock source, the internal oscillator block provides a stable reference source that gives the family additional features for robust operation:

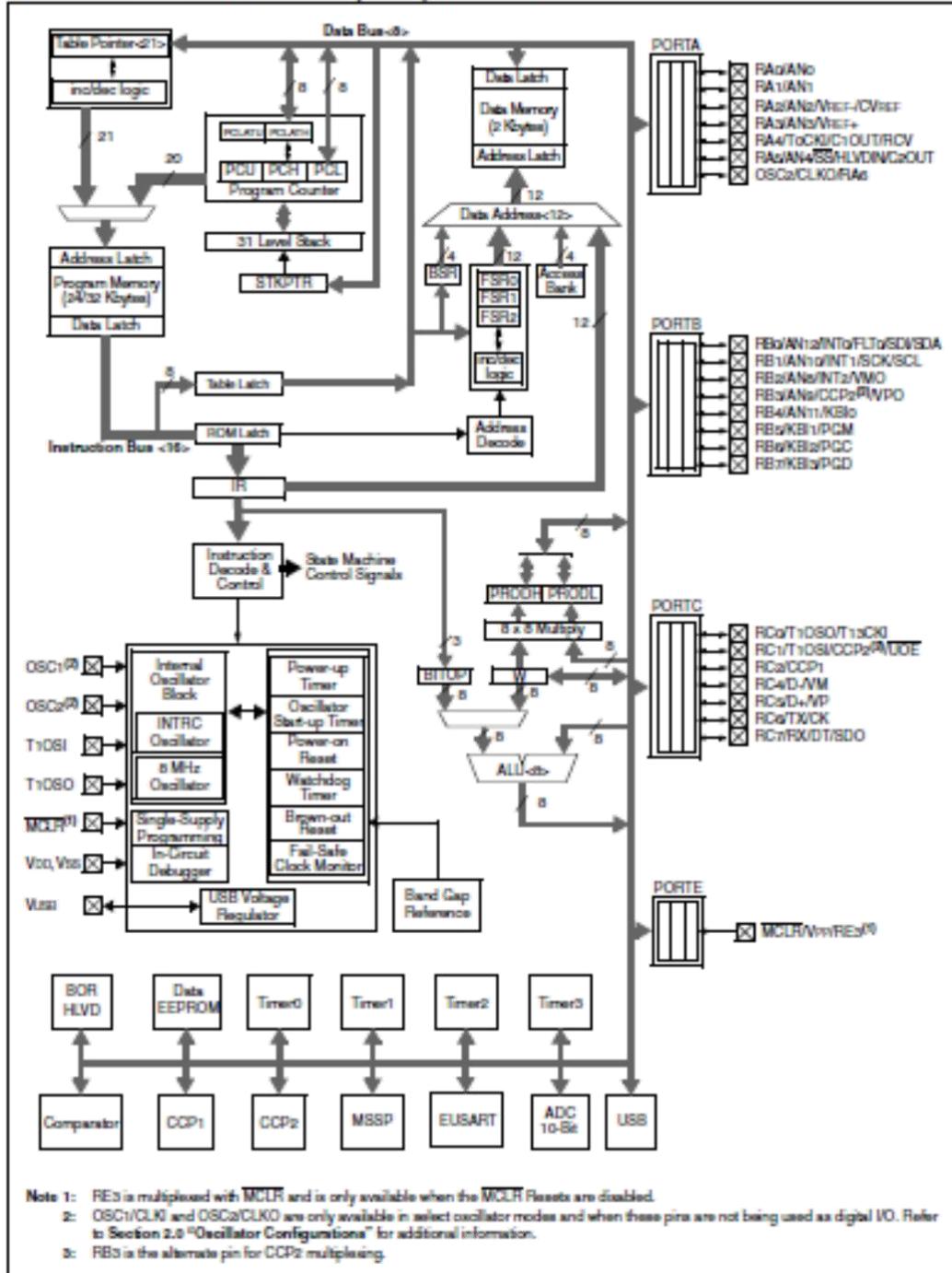
- **Fail-Safe Clock Monitor:** This option constantly monitors the main clock source against a reference signal provided by the internal oscillator. If a clock failure occurs, the controller is switched to the internal oscillator block, allowing for continued low-speed operation or a safe application shutdown.
- **Two-Speed Start-up:** This option allows the internal oscillator to serve as the clock source from Power-on Reset, or wake-up from Sleep mode, until the primary clock source is available.

Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

PIC18F2455/2550/4455/4550

FIGURE 1-1: PIC18F2455/2550 (28-PIN) BLOCK DIAGRAM



Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

PIC18F2455/2550/4455/4550

TABLE 1-3: PIC18F4455/4550 PINOUT I/O DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	PDIP	QFN	TQFP			
MCLR/VPP/RE3 MCLR VPP RE3	1	18	18	I P I	ST ST	Master Clear (input) or programming voltage (input). Master Clear (Reset) input. This pin is an active-low Reset to the device. Programming voltage input. Digital input.
OSC1/CLKI OSC1 CLKI	13	32	30	I I	Analog Analog	Oscillator crystal or external clock input. Oscillator crystal input or external clock source input. External clock source input. Always associated with pin function OSC1. (See OSC2/CLKO pin.)
OSC2/CLKO/RA6 OSC2 CLKO RA6	14	33	31	O O I/O	— — TTL	Oscillator crystal or clock output. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKO which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate. General purpose I/O pin.

Legend: TTL – TTL compatible input CMOS – CMOS compatible input or output
ST – Schmitt Trigger input with CMOS levels I – Input
O – Output P – Power

Note 1: Alternate assignment for CCP2 when CCP2MX Configuration bit is cleared.
Note 2: Default assignment for CCP2 when CCP2MX Configuration bit is set.
Note 3: These pins are No Connect unless the ICPRT Configuration bit is set. For NC/ICPORTS, the pin is No Connect unless ICPRT is set and the DEBUG Configuration bit is cleared.

Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

PIC18F2455/2550/4455/4550

TABLE 1-3: PIC18F4455/4550 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	PDIP	QFN	TQFP			
RC0/T1OSO/T13CKI	15	34	32	I/O	ST	PORTC is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Timer1 oscillator output. Timer1/Timer3 external clock input.
RC0				O	—	
T1OSO T13CKI				I	ST	
RC1/T1OSI/CCP2/ UDE	16	35	35	I/O	ST	Digital I/O. Timer1 oscillator input. Capture 2 input/Compare 2 output/PWM 2 output. External USB transceiver OE output.
RC1				I	CMOS	
T1OSI CCP2 ⁽²⁾				I/O	ST	
UDE				O	—	
RC2/CCP1/P1A	17	36	36	I/O	ST	Digital I/O. Capture 1 input/Compare 1 output/PWM 1 output. Enhanced CCP1 PWM output, channel A.
RC2				I/O	ST	
CCP1 P1A				O	TTL	
RC4/D-/VM	23	42	42	I	TTL	Digital input. USB differential minus line (input/output). External USB transceiver VM input.
RC4				I	TTL	
D- VM				I/O	—	
RC5/D+/VP	24	43	43	I	TTL	Digital input. USB differential plus line (input/output). External USB transceiver VP input.
RC5				I	TTL	
D+ VP				I/O	—	
RC6/TX/CK	25	44	44	I/O	ST	Digital I/O. EUSART asynchronous transmit. EUSART synchronous clock (see RX/DT).
RC6				O	—	
TX CK				I/O	ST	
RC7/RX/DT/SDO	26	1	1	I/O	ST	Digital I/O. EUSART asynchronous receive. EUSART synchronous data (see TX/CK). SPI data out.
RC7				I	ST	
RX DT				I/O	ST	
SDO				O	—	

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power

- Note 1:** Alternate assignment for CCP2 when CCP2MX Configuration bit is cleared.
Note 2: Default assignment for CCP2 when CCP2MX Configuration bit is set.
Note 3: These pins are No Connect unless the ICPRT Configuration bit is set. For NC/ICPORTS, the pin is No Connect unless ICPRT is set and the DEBUG Configuration bit is cleared.

Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

PIC18F2455/2550/4455/4550

TABLE 1-3: PIC18F4455/4550 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	PDIP	QFN	TQFP			
RD0/SPP0 RD0 SPP0	19	38	38	I/O I/O	ST TTL	PORTD is a bidirectional I/O port or a Streaming Parallel Port (SPP). These pins have TTL input buffers when the SPP module is enabled. Digital I/O. Streaming Parallel Port data.
RD1/SPP1 RD1 SPP1	20	39	39	I/O I/O	ST TTL	Digital I/O. Streaming Parallel Port data.
RD2/SPP2 RD2 SPP2	21	40	40	I/O I/O	ST TTL	Digital I/O. Streaming Parallel Port data.
RD3/SPP3 RD3 SPP3	22	41	41	I/O I/O	ST TTL	Digital I/O. Streaming Parallel Port data.
RD4/SPP4 RD4 SPP4	27	2	2	I/O I/O	ST TTL	Digital I/O. Streaming Parallel Port data.
RD5/SPP5/P1B RD5 SPP5 P1B	28	3	3	I/O I/O O	ST TTL —	Digital I/O. Streaming Parallel Port data. Enhanced CCP1 PWM output, channel B.
RD6/SPP6/P1C RD6 SPP6 P1C	29	4	4	I/O I/O O	ST TTL —	Digital I/O. Streaming Parallel Port data. Enhanced CCP1 PWM output, channel C.
RD7/SPP7/P1D RD7 SPP7 P1D	30	5	5	I/O I/O O	ST TTL —	Digital I/O. Streaming Parallel Port data. Enhanced CCP1 PWM output, channel D.

Legend: TTL = TTL compatible input
ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels
O = Output
CMOS = CMOS compatible input or output
I = Input
P = Power

Note 1: Alternate assignment for CCP2 when CCP2MX Configuration bit is cleared.
Note 2: Default assignment for CCP2 when CCP2MX Configuration bit is set.
Note 3: These pins are No Connect unless the ICPRT Configuration bit is set. For NCICPORTS, the pin is No Connect unless ICPRT is set and the DEBUG Configuration bit is cleared.

Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

PIC18F2455/2550/4455/4550

TABLE 1-3: PIC18F4455/4550 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	PDIP	QFN	TQFP			
RE0/AN5/CK1SPP RE0 AN5 CK1SPP	8	25	25	I/O I O	ST Analog —	PORTE is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Analog input 5. SPP clock 1 output.
RE1/AN6/CK2SPP RE1 AN6 CK2SPP	9	26	26	I/O I O	ST Analog —	Digital I/O. Analog input 6. SPP clock 2 output.
RE2/AN7/OESPP RE2 AN7 OESPP	10	27	27	I/O I O	ST Analog —	Digital I/O. Analog input 7. SPP output enable output.
RE3	—	—	—	—	—	See MCLR/VPP/RE3 pin.
VSS	12, 31	6, 30, 31	6, 29	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	11, 32	7, 8, 28, 29	7, 28	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
VUSB	18	37	37	O	—	Internal USB 3.3V voltage regulator output.
NC/ICCK/ICPGC ⁽²⁾ ICCK ICPGC	—	—	12	I/O I/O	ST ST	No Connect or dedicated ICD/ICSP™ port clock. In-Circuit Debugger clock. ICSP programming clock.
NC/ICDT/ICPGD ⁽²⁾ ICDT ICPGD	—	—	13	I/O I/O	ST ST	No Connect or dedicated ICD/ICSP port clock. In-Circuit Debugger data. ICSP programming data.
NC/ICRST/ICVPP ⁽²⁾ ICRST ICVPP	—	—	33	I P	— —	No Connect or dedicated ICD/ICSP port Reset. Master Clear (Reset) input. Programming voltage input.
NC/ICPORTS ⁽²⁾ ICPORTS	—	—	34	P	—	No Connect or 28-pin device emulation. Enable 28-pin device emulation when connected to VSS.
NC	—	13	—	—	—	No Connect.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power

- Note 1:** Alternate assignment for CCP2 when CCP2MX Configuration bit is cleared.
Note 2: Default assignment for CCP2 when CCP2MX Configuration bit is set.
Note 3: These pins are No Connect unless the ICPRT Configuration bit is set. For NC/ICPORTS, the pin is No Connect unless ICPRT is set and the DEBUG Configuration bit is cleared.

Fuente:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

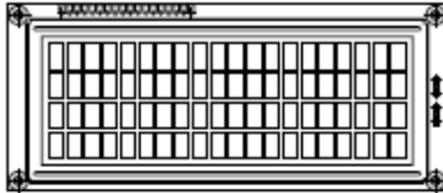
Anexo 3: Datasheet LCD 4x20.



LCD-020N004L

Vishay

20 x 4 Character LCD



FEATURES

- Type: Character
- Display format: 20 x 4 characters
- Built-in controller: ST 7066 (or equivalent)
- Duty cycle: 1/16
- 5 x 8 dots includes cursor
- + 5 V power supply (also available for + 3 V)
- LED can be driven by pin 1, pin 2, pin 15, pin 16 or A and K
- N.V. optional for + 3 V power supply
- Material categorization: For definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912



RoHS
COMPLIANT

MECHANICAL DATA		
ITEM	STANDARD VALUE	UNIT
Module Dimension	146.0 x 62.5	mm
Viewing Area	123.5 x 43.0	
Dot Size	0.92 x 1.10	
Dot Pitch	0.98 x 1.16	
Mounting Hole	130.0 x 55.5	
Character Size	4.84 x 9.22	

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS					
ITEM	SYMBOL	STANDARD VALUE			UNIT
		MIN.	TYP.	MAX.	
Power Supply	V_{DD} to V_{SS}	- 0.3	-	7.0	V
Input Voltage	V_I	- 0.3	-	V_{DD}	

Note

- $V_{SS} = 0$ V, $V_{DD} = 5.0$ V

ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
ITEM	SYMBOL	CONDITION	STANDARD VALUE			UNIT
			MIN.	TYP.	MAX.	
Input Voltage	V_{DD}	$V_{DD} = + 5$ V	4.7	5.0	5.3	V
		$V_{DD} = + 3$ V	2.7	3.0	3.3	
Supply Current	I_{DD}	$V_{DD} = + 5$ V	-	8.0	10.0	mA
Recommended LC Driving Voltage for Normal Temperature Version Module	V_{DD} to V_I	- 20 °C	5.0	5.1	5.7	V
		0 °C	4.6	4.8	5.2	
		25 °C	4.1	4.5	4.7	
		50 °C	3.9	4.2	4.5	
		70 °C	3.7	3.9	4.3	
LED Forward Voltage	V_f	25 °C	-	4.2	4.6	V
LED Forward Current	I_f	25 °C	-	540	1080	mA
EL Power Supply Current	I_{EL}	$V_{SS} = 110$ V _{AC} , 400 Hz	-	-	5.0	mA

OPTIONS									
TN	PROCESS COLOR					BACKLIGHT			
	STN Gray	STN Yellow	STN Blue	FSTN B&W	STN Color	None	LED	EL	CCFL
X	X	X	X	X		X	X	X	

For detailed information, please see the "Product Numbering System" document.

DISPLAY CHARACTER ADDRESS CODE																				
Display Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
DD RAM Address	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F	10	11	12	13
DD RAM Address	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	4A	4B	4C	4D	4E	4F	50	51	52	53
DD RAM Address	14	15	16	17	18	19	1A	1B	1C	1D	1E	1F	20	21	22	23	24	25	26	27
DD RAM Address	54	55	56	57	58	59	5A	5B	5C	5D	5E	5F	60	61	62	63	64	65	66	67

Revision: 09-Oct-12

1

Document Number: 37314

For technical questions, contact: display@vishay.com

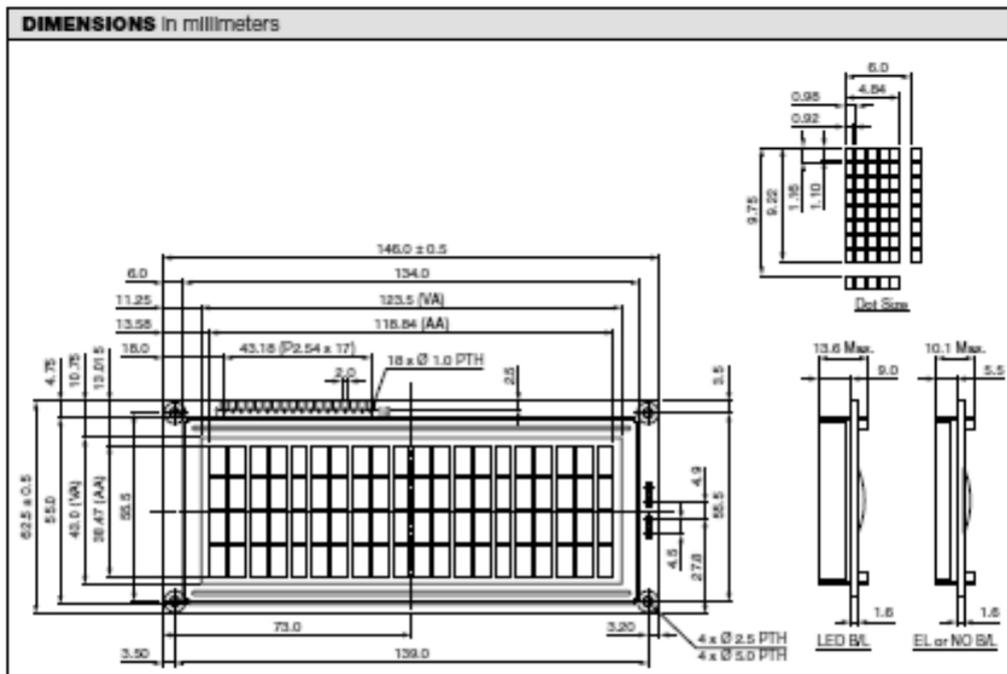
THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?991000

Fuente:

http://www.systonix.com/access/Systonix_20x4_lcd_brief_data.pdf



INTERFACE PIN FUNCTION		
PIN NO.	SYMBOL	FUNCTION
1	V _{SS}	Ground
2	V _{DD}	+ 3 V or + 5 V
3	V ₀	Contrast adjustment
4	RS	H/L register select signal
5	R/W	H/L read/write signal
6	E	H → L enable signal
7	DB0	H/L data bus line
8	DB1	H/L data bus line
9	DB2	H/L data bus line
10	DB3	H/L data bus line
11	DB4	H/L data bus line
12	DB5	H/L data bus line
13	DB6	H/L data bus line
14	DB7	H/L data bus line
15	A	Power supply for LED (4.2 V)
16	K	Power supply for BL (0 V)
17	NC/V _{EE}	NC or negative voltage output
18	NC	NC connection



Fuente:

http://www.systonix.com/access/Systonix_20x4_lcd_brief_data.pdf



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and/or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Material Category Policy

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as RoHS-Compliant fulfill the definitions and restrictions defined under Directive 2011/65/EU of The European Parliament and of the Council of June 8, 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (EEE) - recast, unless otherwise specified as non-compliant.

Please note that some Vishay documentation may still make reference to RoHS Directive 2002/95/EC. We confirm that all the products identified as being compliant to Directive 2002/95/EC conform to Directive 2011/65/EU.

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as Halogen-Free follow Halogen-Free requirements as per JEDEC JS709A standards. Please note that some Vishay documentation may still make reference to the IEC 61249-2-21 definition. We confirm that all the products identified as being compliant to IEC 61249-2-21 conform to JEDEC JS709A standards.

Fuente:

http://www.systronix.com/access/Systronix_20x4_lcd_brief_data.pdf

Anexo 4: Variador de frecuencia Sinamics G110 de Siemens.

04/2005

Aspectos generales

1 Aspectos generales

1.1 SINAMICS G110

Los convertidores SINAMICS G110 son convertidores de frecuencia para regular la velocidad en motores trifásicos. Los diferentes modelos que se suministran cubren un margen de potencia de 120 W a 3,0 kW en redes monofásicas.

Los convertidores están controlados por microprocesador y utilizan tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación. Esto los hace fiables y versátiles. Un método especial de modulación por ancho de impulsos con frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor. Extensas funciones de seguridad ofrecen una protección excelente tanto del convertidor como del motor.

Con sus ajustes por defecto realizados en fábrica, SINAMICS G110 es ideal para una gran gama de aplicaciones sencillas de control de motores V/f.

Haciendo uso del gran número de parámetros de ajuste de que dispone, también puede utilizarse SINAMICS G110 en aplicaciones más avanzadas para control de accionamientos.

Los valores de parámetros para el SINAMICS G110 se pueden modificar con el panel BOP (Basic Operator Panel) o bien mediante la interface USS.

SINAMICS G110 existe en dos variantes:

- > Variante USS
- > Variante analógica

Ambos modelos con o sin filtro EMC y disipador plano.

El SINAMICS G110 puede utilizarse tanto en aplicaciones donde se encuentre aislado como integrado en sistemas de automatización.

Fuente:

http://www.technical.cat/PDF/Siemens/MECATRONICA/manual_sinamics_G110.pdf

1.2 Características

Características principales

- Fácil de instalar
- Puesta en marcha sencilla
 - ◆ puesta en servicio rápida
 - ◆ función "reposición a valores de fábrica" (reajusta los parámetros a sus valores por defecto)
- Diseño robusto en cuanto a EMC
- Puede funcionar en redes de alimentación IT (modelos sin filtro)
- 1 entrada digital con separación galvánica
- 3 entradas digitales sin separación galvánica
- 1 entrada analógica AIN: 0 – 10 V (solo en la variante analógica) se puede utilizar como cuarta entrada digital.
- Altas frecuencias de pulsación para funcionamiento silencioso del motor
- La información de estado y alarmas se visualizan en el panel BOP (obtenible como opción)
- BOP opcional con funcionalidad de copia de parámetros para juegos de parámetros
- Interface interna RS485 (solo en la variante USS)
- Kit de conexión para el enlace PC-convertidor (RS232)

Funciones

- Tiempo de respuesta a señales de mando rápido
- Limitación rápida de corriente (fast current limit FCL) para funcionamiento seguro sin desconexiones por fallo
- Freno combinado
- Freno por inyección de corriente continua integrado
- Frecuencias fijas
- Función de potenciómetro motorizado
- Tiempos de aceleración y deceleración ajustables con redondeo parametrizable
- Característica V/f multipunto
- 150% de sobrecarga en 60 segundos
- Control con 2-hilos/3-hilos control
- Rearranque automático después de cortes de red
- Rearranque al vuelo

Características de protección

- Protección sobretensión / subtensión
- Protección de sobretemperatura para el convertidor
- Protección de defecto a tierra
- Protección de cortocircuito
- Protección térmica del motor por I^2t
- Protección contra la pérdida de estabilidad (vuelco) del motor

Fuente:

http://www.technical.cat/PDF/Siemens/MECATRONICA/manual_sinamics_G110.pdf

2 Instalación



ADVERTENCIA

- Si en el equipo/sistema trabaja personal **no cualificado** o si no se respetan las advertencias pueden ocasionarse lesiones graves o daños materiales considerables. En el equipo/sistema sólo deberá trabajar personal cualificado y familiarizado con el montaje, instalación, puesta en servicio y operación del producto.
- Sólo se permiten conexiones de red cableadas de forma permanente. El equipo debe ponerse a tierra (IEC 536, clase 1, NEC y otras normas aplicables).
- Si está instalado un dispositivo de protección de corriente diferencial-residual (RCD) este tiene que ser de tipo B. Sin embargo, si el convertidor SINAMICS G110 está conectado a una fase de red principal en estrella con punto neutro puesto a tierra el RCD puede ser de tipo A.
- Debido a los condensadores del circuito intermedio, las conexiones de los cables de red, del motor y del circuito intermedio conducen tensiones peligrosas aunque este desconectada la alimentación. Espere cinco minutos para permitir que se descarguen los condensadores antes de comenzar cualquier trabajo de instalación en el equipo.
- Este equipo no debe utilizarse como "mecanismo de parada de emergencia" (véase EN 60204, 9.2.5.4).
- La sección del conductor de protección debe tener un tamaño por lo menos igual que la sección de los cables de alimentación de red.
- Al instalar convertidores se deberán cumplir los reglamentos de seguridad.

PRECAUCIÓN

La conexión de los cables de red, del motor y de mando o control deberán realizarse de la forma mostrada en la Figura 2-8, en la página 31, a fin de evitar que interferencias de tipo inductivo y capacitivo afecten al correcto funcionamiento del convertidor.

Fuente:

http://www.technical.cat/PDF/Siemens/MECATRONICA/manual_sinamics_G110.pdf

2.1 Generalidades

Instalación tras un período de almacenamiento

Después de un período de almacenamiento prolongado es necesario volver a formar los condensadores del convertidor. Tenga en cuenta que el tiempo de almacenamiento lo tiene que calcular a partir de la fecha de fabricación y no a partir de la fecha de suministro que le proporcione su distribuidor. A continuación se detallan las condiciones necesarias.

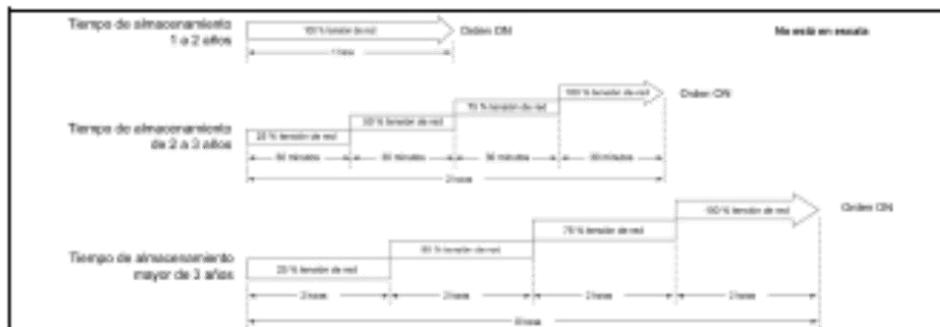


Figura 2-1 Formar, dependiendo del período de almacenamiento

El número de serie consta de trece caracteres. En ellos está contenida la fecha de fabricación. P. ej.: XAP214-123456

XAP214-123456	caracteres 1 y 2:	Lugar de producción
XAP214-123456	carácter 3:	Año de producción, p. ej.: R = 2003
XAP214-123456	carácter 4:	Mes de producción: (1 - 9 = enero - sep., O = octubre, N = nov., D = dic.)
XAP214-123456	caracteres 5 y 6:	Día de producción
XAP214-123456	carácter 7:	Gulón
XAP214-123456	caracteres 8 a 13:	Número de serie: 1 - 999999

2.2 Disipación de potencia

Encontrará detalles sobre la disipación de potencia en la Tabla 7-6 en la página 75.

2.3 Condiciones ambientales para el servicio

Temperatura

-10 °C hasta +50 °C (14 °F hasta 122 °F). Encontrará mayores detalles sobre factores de reducción en la Tabla 7-8, en la página 76.

Humedad

Humedad relativa ≤ 95 % sin condensación.

Fuente:

http://www.technical.cat/PDF/Siemens/MECATRONICA/manual_sinamics_G110.pdf

Altitud

Si el convertidor debe instalarse a una altitud > 1000 m o a partir de 2000 m sobre el nivel del mar rigen las curvas de reducción de la figura Figura 2-2:

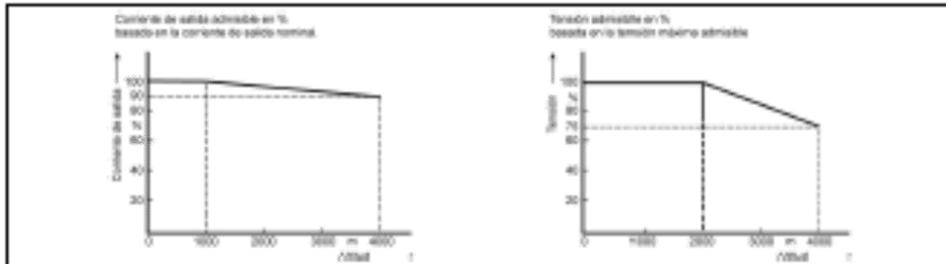


Figura 2-2 Curvas de reducción para corriente y tensión en función de la altitud.

Choques y Vibraciones

No dejar caer el convertidor o exponerlo a choques bruscos. No instalar el convertidor en un área que puede estar expuesta a vibraciones constantes.

Resistencia mecánica según EN 60721-3-3

- > Movimiento de adaptación: 0,075 mm (10 Hz a 58 Hz)
- > Aceleración: 10 m/s² (58 Hz a 200 Hz)

Radiación electromagnética

No instalar el convertidor cerca de fuentes de radiación electromagnética.

Contaminación atmosférica

No instalar el convertidor en un entorno que contenga contaminantes atmosféricos tales como polvo, gases corrosivos, etc.

Agua y humedad

Tomar las precauciones necesarias para evitar instalar el convertidor en lugares donde pueda presentarse humedad y condensación excesivas, p. ej. no instalarlo cerca de tuberías con peligro de condensación.

Instalación y refrigeración



ADVERTENCIA

Los convertidores se deben montar en posición frontal - vertical para asegurar la refrigeración necesaria.

Asegúrese que las aletas de enfriamiento del convertidor no estén tapadas ni obstruidas. Las distancias de montaje necesarias se encuentran en la Figura 2-4, en la página 25.

Fuente:

http://www.technical.cat/PDF/Siemens/MECATRONICA/manual_sinamics_G110.pdf

2.4 Oscilaciones armónicas de la corriente

Los detalles sobre las oscilaciones armónicas de la corriente se encuentran en la Tabla 9-1, en la página 80.

2.5 Reducción de la corriente de entrada en función de la frecuencia de pulsación

Los detalles para reducir la corriente de entrada se encuentran en la Tabla 7-8, en la página 76.

2.6 Sobretensión y umbral de desconexión

El convertidor se desconecta para su protección cuando se produce sobretensión o subtensión de red.



ADVERTENCIA

A pesar que después de una puesta en servicio correcta el convertidor está protegido contra sobretensión, se puede destruir si se conecta a tensiones extremadamente elevadas y se pueden producir lesiones corporales.

2.7 Desconexión por sobrecorriente

El convertidor está protegido contra cortocircuitos de las fases del motor entre sí y a tierra. También está protegido contra altas corrientes que puedan surgir por sobrecarga en el motor.

Fuente:

http://www.technical.cat/PDF/Siemens/MECATRONICA/manual_sinamics_G110.pdf

2.8 Instalación mecánica



ADVERTENCIA

- Para asegurar el funcionamiento correcto de este equipo, deberá ser instalado y puesto en servicio por personal cualificado y cumpliendo plenamente las advertencias especificadas en estas instrucciones.
- Considerar especialmente los reglamentos de instalación y seguridad generales y regionales relativos al trabajo en instalaciones con tensión peligrosa (p. ej. EN 50178), al igual que los reglamentos importantes sobre uso correcto de herramientas y equipos de protección personal.
- En los cables que están conectados al convertidor nunca se deben llevar a cabo ensayos de aislamiento de alta tensión.
- Debido a los condensadores del circuito intermedio, las conexiones de los cables de red, del motor y del circuito intermedio conducen tensiones peligrosas aunque este desconectada la alimentación. Espere cinco minutos para permitir que se descarguen los condensadores antes de comenzar cualquier trabajo de instalación en el equipo.



PRECAUCIÓN

Los cables de alimentación y los del motor, es necesario tenerlos separados de los cables de mando. No llevarlos a través del mismo conducto/canaleta.

Tabla 2-1 Dimensiones del SINAMICS G110

Tamaño constructivo	Potencia de salida	Dimensiones Alto x ancho x profundo	Profundidad con el BOP	Medidas perforaciones Alt.1 x Ancho 2
mm				
A	120 W – 370 W	150 x 90 x 116	124	140 x 79
A	550 W – 750 W	150 x 90 x 131	139	140 x 79
A (Flat Plate)	120 W – 750 W	150 x 90 x 101	109	140 x 79
B	1.1 kW – 1,5 kW	160 x 140 x 142	150	135 x 127
C	2.2 kW – 3 kW	181 x 184 x 152	160	140 x 170
Pulgadas				
A	120 W – 370 W	5.91 x 3.54 x 4.57	4.88	5.51 x 3.11
A	550 W – 750 W	5.91 x 3.54 x 5.16	5.47	5.51 x 3.11
A (Flat Plate)	120 W – 750 W	5.91 x 3.54 x 4.01	4.29	5.51 x 3.11
B	1.1 kW – 1,5 kW	6.30 x 5.51 x 5.59	5.90	5.31 x 5.0
C	2.2 kW – 3 kW	7.13 x 7.24 x 5.98	6.29	5.51 x 6.70

Fuente:

http://www.technical.cat/PDF/Siemens/MECATRONICA/manual_sinamics_G110.pdf

3 Puesta en servicio

Este capítulo describe los diferentes modos de operación y puestas en servicio del SINAMICS G110. El requisito para ponerlo en servicio es haber finalizado la instalación mecánica y eléctrica descrita en la sección 2.



ADVERTENCIA

- Los SINAMICS G110 funcionan con tensiones elevadas.
- Durante el funcionamiento de dispositivos eléctricos es imposible evitar la aplicación de tensiones peligrosas en ciertas partes del equipo.
- Los dispositivos de parada de emergencia, de acuerdo a EN 60204 IEC 204 (VDE 0113), deberán permanecer operativos en todos los modos de funcionamiento del equipo de control. Cualquier reinicialización del dispositivo de parada de emergencia, no deberá conducir a un re arranque incontrolado o indefinido.
- En el caso, que un cortocircuito en el equipo de control pueda producir daños materiales considerables, o incluso graves lesiones corporales (p. ej. defectos potencialmente peligrosos), se deben tomar medidas de precaución externas adicionales o instalar dispositivos, que aseguren o fuercen un funcionamiento seguro aunque ocurra un cortocircuito (p. ej. finales de carrera independientes, enclavamientos mecánicos, etc.).
- Determinados ajustes de parámetros pueden provocar el re arranque automático del convertidor tras un fallo de la red de alimentación.
- Los parámetros del motor se deben configurar con precisión para que la protección de sobrecarga del motor funcione correctamente para frecuencias mayores de 5 Hz.
- Este equipo es capaz de proporcionar una protección de sobrecarga del motor interna de acuerdo a UL508C sección 42. Véanse P0610 y P0335. La vigilancia I^2t está activada por defecto.
- Este equipo es apto para utilizarlo en redes equilibradas capaces de entregar como máximo 10.000 amperios (eficaces), para tensiones máximas de 230 V si está protegido por fusible de tipo H o K, un interruptor automático o mediante una línea derivada para el motor protegida.
- Este equipo no debe utilizarse como "mecanismo de parada de emergencia" (véase EN 60204, 9.2.5.4).

PRECAUCIÓN

Sólo el personal cualificado puede modificar ajustes mediante paneles de operaciones. Especialmente es necesario prestar en todo momento particular atención a las precauciones de seguridad y las advertencias.

NOTAS

- El SINAMICS G110 no posee interruptor principal y está bajo tensión al conectar la alimentación de red. El convertidor permanece en estado "listo para servicio" con los impulsos bloqueados hasta que se imparta la orden ON (mediante el botón correspondiente en el panel o mediante el borne 3).
 - El convertidor está diseñado para aceptar señales de control solo para detener o arrancar el motor.
-

Fuente:

http://www.technical.cat/PDF/Siemens/MECATRONICA/manual_sinamics_G110.pdf

3.1 Diagrama de bloques

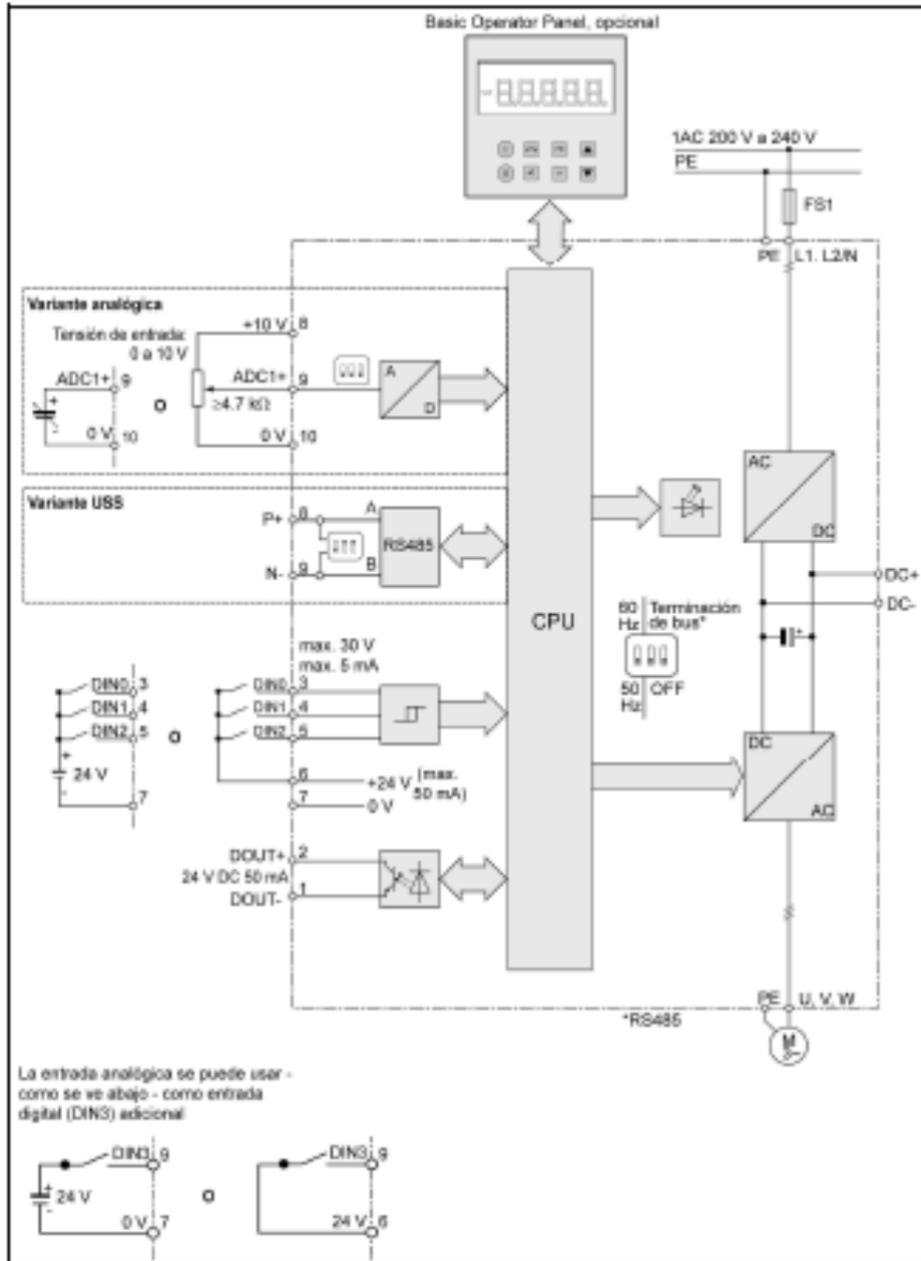
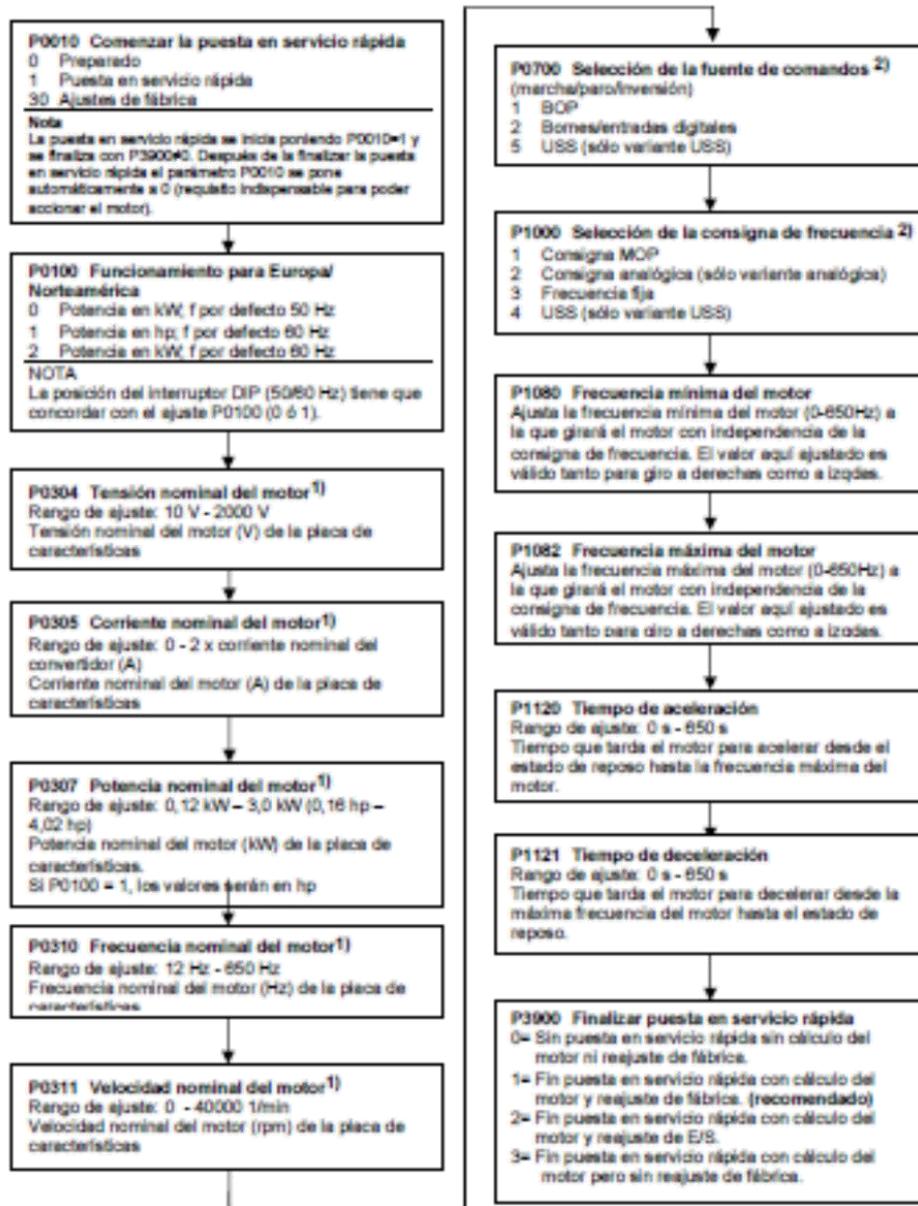


Figura 3-1 Diagrama de bloques del SINAMICS G110

Fuente:
http://www.technical.cat/PDF/Siemens/MECATRONICA/manual_sinamics_G110.pdf

Diagrama de flujo para puesta en servicio rápida (nivel de acceso 1 - P0003=1)



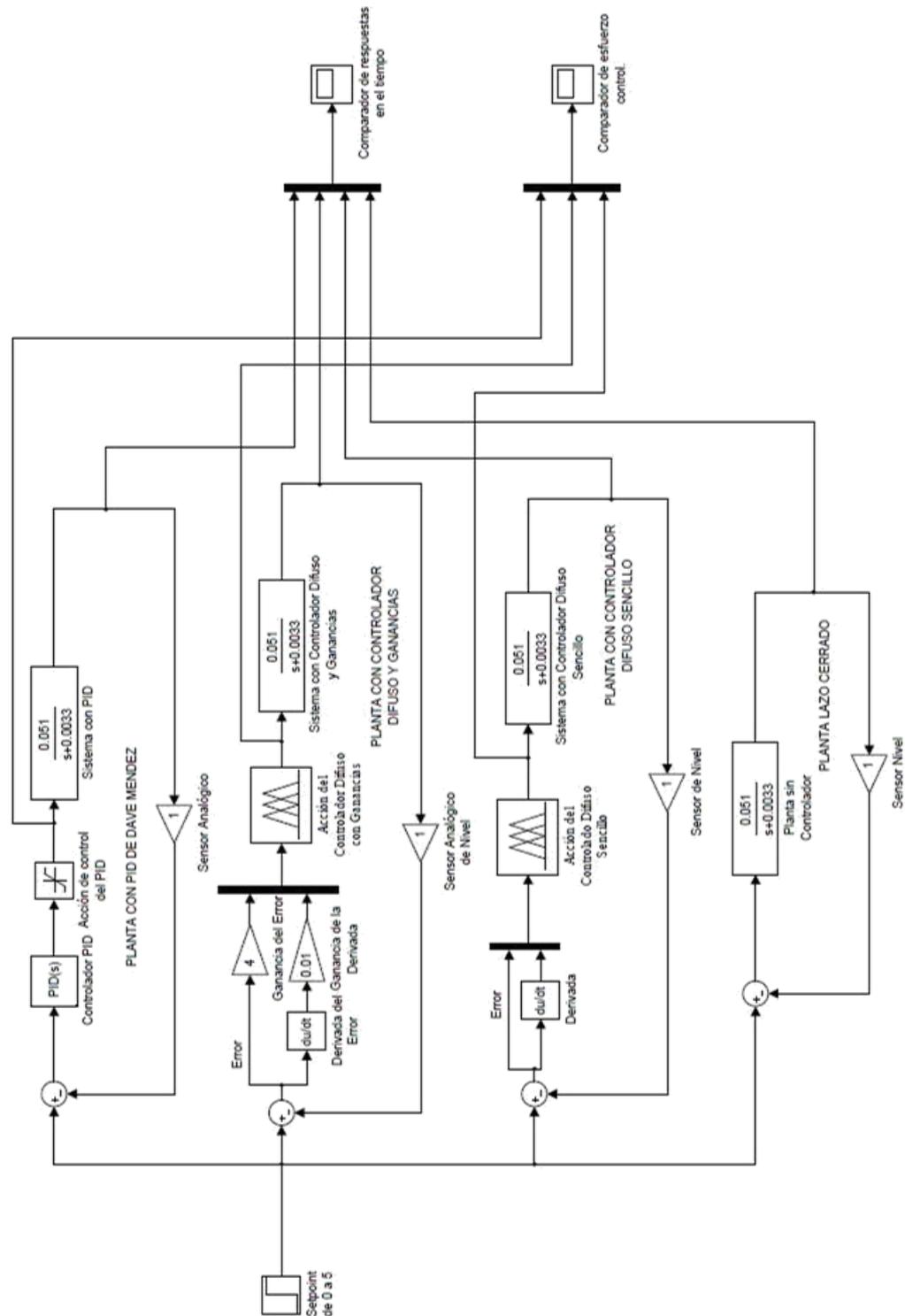
¹⁾ Parámetros relacionados con el motor. Consulte la placa de características del motor.

²⁾ Son parámetros que contienen una lista más detallada de posibles ajustes para su uso en aplicaciones específicas. Consulte la Lista de parámetros.

Fuente:

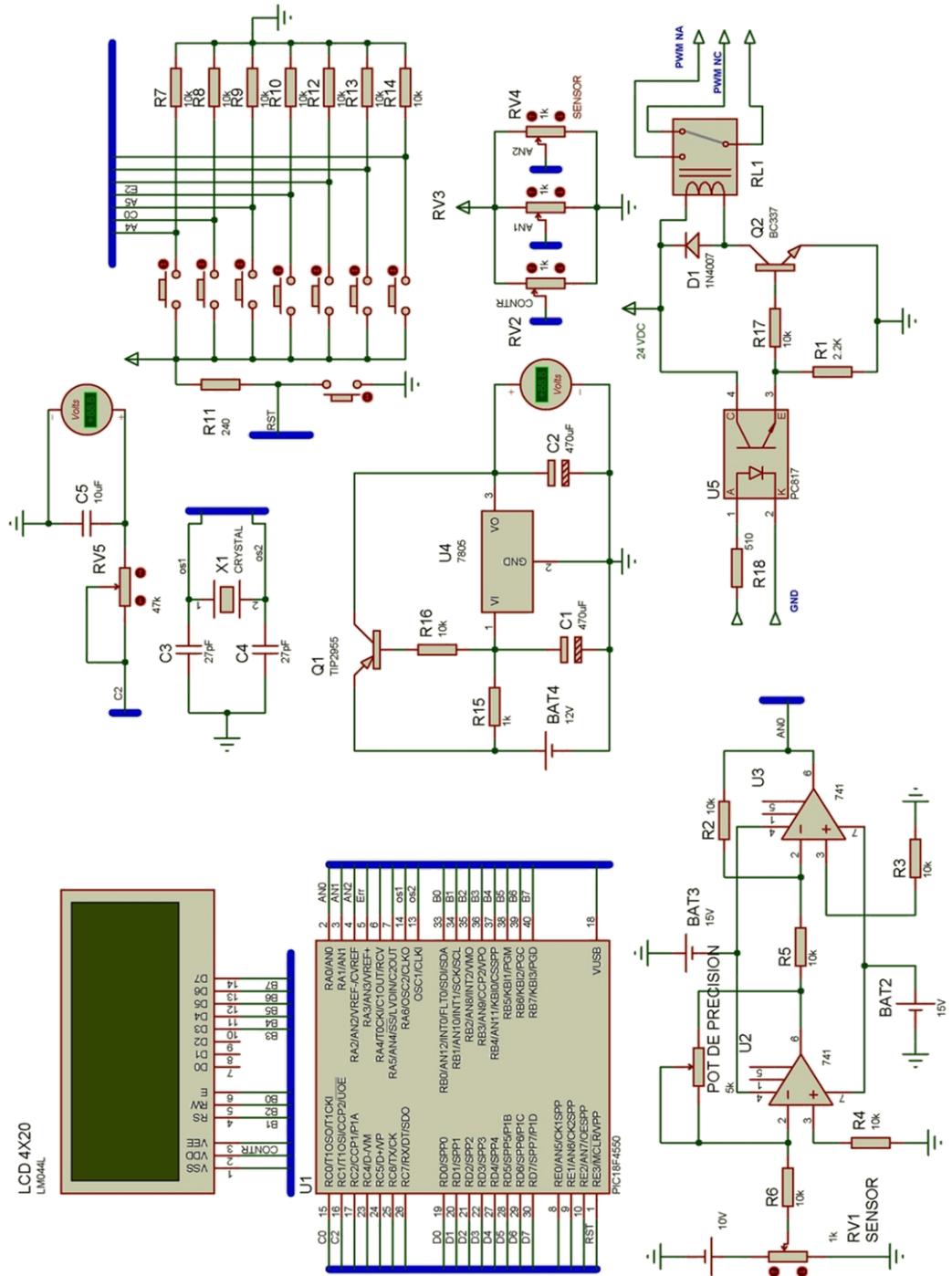
http://www.technical.cat/PDF/Siemens/MECATRONICA/manual_sinamics_G110.pdf

Anexo 5: Diagrama de control para simulaciones matemáticas.



Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

Anexo 6: Diagrama de conexiones electrónicas.



Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

Anexo 7: Diseño de diagramas PCB

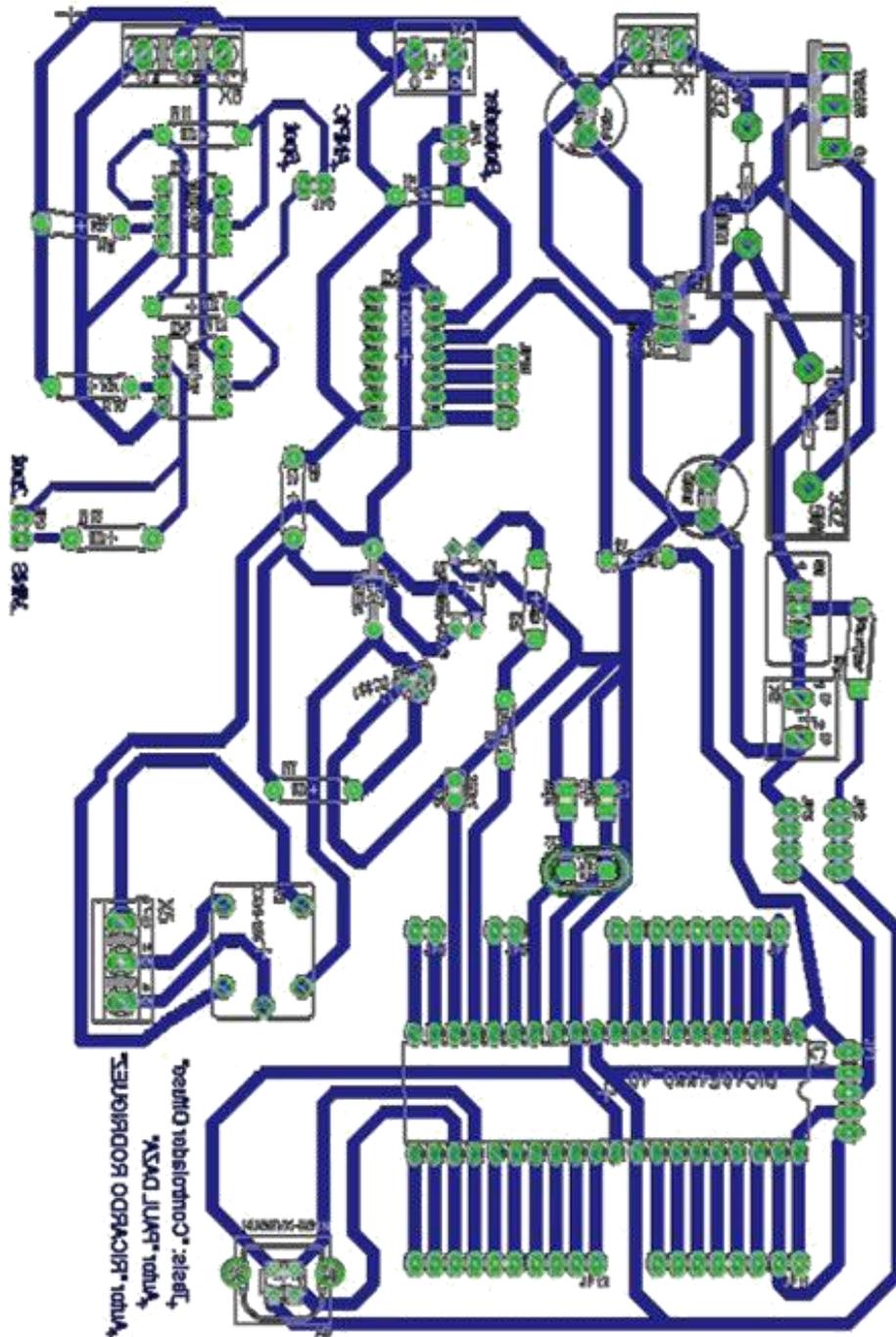


Diagrama PCB de tarjeta principal

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

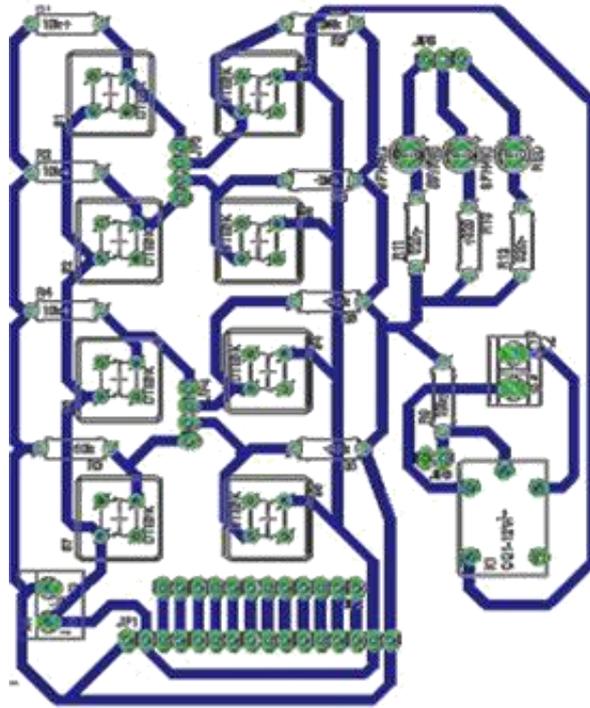


Diagrama PCB de tarjeta secundaria

Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

Anexo 8: Programación del módulo en lenguaje C en la plataforma Pic C.

```
/////////////////////////////////////////////////////////////////
//
//          Controlador Fuzzy Logic          //
//          ***** Autores*****          //
//          Paul James Daza Barzola          //
//          Ricardo Daniel Rodriguez Segura  //
//          Tutor: Ing. Efrén Herrera Muentes MGS. //
//
/////////////////////////////////////////////////////////////////

#include <18F2550.h>
#define adc=10
#define FUSES HS

#define use_delay(clock=8000000,restart_wdt)

#define PORTA= 0xF80
#define PORTB= 0xF81
#define PORTC= 0xF82
#define PORTE= 0xF84

#define PULS1= PORTC.0 // Pulsador Marrón
#define PULS2= PORTA.6 // Pulsador verde

#define use_portb_lcd TRUE
#include <LCD420.C>

//entrada y visualizacion
float potII; //AN1
float potIII; //An2
float error; //error
float asal; // Convercion
float herz; //convercion a herz
float afinacion; // an0
float afisnacion; // presentacion a porcentaje

//constante de grado de pertenencia del error
float eb;
float em;
float ea;

//contante grado de pertenencia error
float PF;
float PI;
float PV;

//deriva del error ( rapidez de cambio)
int con;
```

```

int     reg1;
int     reg2;
float   mul;
float   reg3;
float   der;
float   reg4;
float   sum;

//el minimo
float minimol;
float min2;
float min3;
float min4;
float min5;
float min6;
float min7;
float min8;
float min9;

//pertenencias en y salidas
float j;
float k;
float l;

//resultado de salida
float fj;
float f1k;
float f2k;
float fl;
float formulasalida;
int16 i,prueba;

//convercion en porcentaje
float porspt;    //porcentaje de setpoint
float porIN;    //porcentaje de entrada
float porsal;   // porcentaje de salida
float porer;    // `porcentaje de error

void caso1 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("1");

    EB=1;
    EM=0;
}

void caso2 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);

```

```

    lcd_putc("2");

    EB=1; //EC2
    EM=(0.33*error)+1;
}

void caso3 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("3");

    EB=(-0.5*error); //EC2
    EM=(0.33*error)+1; //EC3
}

void caso4 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("4");

    EM=(-0.33*error)+1; //EC3
    EA=0.5*error;
}

void caso5 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("5");

    EM=(-0.33*error)+1;
    EA=1;
}

void caso6 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("6");

    EM=0; //ecu4
    EA=1;
}
// grado de pertenencia de la derivada del error
void caso11 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("1");

    PF=1;
    PI=0;
}

```

```

void cas012 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("2");

    PF=(-22.026*der)-0.33; //EC2
    PI=0;
}

void cas013 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("3");

    PF=(-22.026*der)-0.33; //EC2
    PI=(33.113*der)+1;
}

void cas014 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("4");

    PI=(33.113*der)+1;
    PV=0;
}

void cas015 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("5");

    PI=1;
    PV=0;
}

void cas016 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("6");

    PI=(-160*der)+1;
    PV=0;
}

void cas017 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("7");
}

```

```

    PI=(-160*der)+1;
    PV=(106.66*der)-0.33;
}

void caso18 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("8");

    PI=0;
    PV=(106.66*der)-0.3333;
}

void caso19 (void)
{
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("9");

    PI=0;
    PV=1;
}

void main()
{
    setup_adc_ports(AN0_TO_AN4|VSS_VDD);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    setup_spi(FALSE);
    setup_wdt(WDT_ON);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_4);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,255,1);
    // Frecuencia = clock / 4 / prescaler / (repeticiones+1) =
8000000/4/4/(255+1)=1953
    setup_timer_3(T3_DISABLED|T3_DIV_BY_1);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);
    lcd_init();
    lcd_gotoxy(2,1); lcd_putc("Controlador Fuzzy");
    lcd_gotoxy(7,2); lcd_putc("Autores");
    lcd_gotoxy(5,3); lcd_putc("Paul J. Daza");
    lcd_gotoxy(1,4); lcd_putc("Ricardo D. Rodriguez");
    delay_ms(500);
    lcd_putc("\f");
    enable_interrupts(INT_TIMER0);
    enable_interrupts(INT_AD);
    enable_interrupts(GLOBAL);
    setup_low_volt_detect(FALSE);
}

```

```

i=512; // punto medio del duty de 10 bits
setup_ccp1(CCP_PWM);
set_pwm1_duty(i);

while (1)
{

    set_pwm1_duty(i);
    set_adc_channel(0);
    prueba = read_adc();
    afinacion=(prueba/204.8);
    //setpoint analogico
    set_adc_channel(1);
    potII=read_adc();
    potII=(potII/204.8);
    porspt=potII*20;
    lcd_gotoxy(11,1); printf(lcd_putc,"SPT=%1.1f%%",porspt);

    //canal de prueba
    set_adc_channel(2);
    potIII=read_adc();
    potIII=(potIII/204.8);

    porIN=(potIII * 20);
    lcd_gotoxy(2,1); printf(lcd_putc,"IN=%1.1f%%",porIN);
//sensor prueba original (1,4)

    //ERROR
    error=(potII-potIII);
    porer=(error * 20);
    lcd_gotoxy(1,2); printf(lcd_putc,"ERROR=%1.1f%%",porer);
//sensor prueba original (1,4)

    //operaciones de la derivada
    mul=error*50;
    con=mul;
    write_eeprom(reg1,con);
    reg1=(reg1+1);

//Ecuaciones de pertenencia
if ((error <= -5 ) && (error >=-3))
{
caso1();
}
else if ((error > -3) && (error <=-2))
{
caso2();
}
else if ((error>-2) && (error<=0))
{

```

```

    caso3();
  }
  else if ((error>0) && (error<2))
  {
    caso4();
  }

  else if ((error>=2) && (error<=3))
  {
    caso5();
  }
  else if ((error>3) && (error<5))
  {
    caso6();
  }

  //Ecuaciones de pertenencia de la derivada del error
  reg2=READ_EEPROM(0);
  delay_ms(100);
  reg4=reg2;
  reg3=(reg4/50);
  sum=(error-reg3);
  der=(sum/4);
  der=der*0.01;
  //ganancia a la derivada // se divide para 4 porque las ecuaciones
  // estan para 1 intervalo de segundo y el tiempo del programa es de 4
  // al finalizar el programa debera volverse a calcular el tiempo de
  // cambio

  //lcd_gotoxy(10,3); printf(lcd_putc,"de=%1.5f",der);
  lcd_gotoxy(19,3); printf(lcd_putc,"%u",reg1); //devolver

  if (reg1>1)
  {
    reg1=0;
  }

  // reglas de pertenencia derivada del error
  if (der <= -0.060415 )
  {
    caso11();
  }
  else if ((der > -0.06415) && (der < -0.0302075))
  {
    caso12();
  }
  else if ((der >= -0.0302075) && (der <= -0.01510375))
  {
    caso13();
  }

```

```

}
else if ((der > -0.01510375) && (der < 0))
{
    caso14();
}
else if (der == 0)
{
    caso15();
}
else if ((der > 0) && (der < 0.003125))
{
    caso16();
}
else if ((der >= 0.003125) && (der <= 0.00625))
{
    caso17();
}
else if ((der > 0.00625) && (der < 0.0125))
{
    caso18();
}
else if (der >= 0.0125)
{
    caso19();
}

//1.-Base del conocimiento
// Accion de control error bajo
if ((EB>0) && (PF>0))
{
    if (EB <= PF)
    {
        minimol=EB;
    }
    if (PF<EB)
    {
        minimol=PF;
    }
}

if ((EB>0) && (PI>0))
{
    if (EB <= PI)
    {
        min2=EB;
    }
    if (PI < EB)

```

```

{
min2=PI;
}
}

if ((EB>0) && (PV>0))
{
if (EB <= PV)
{
min3=EB;
}
if (PV < EB)//
{
min3=PV;
}
}

//Error medio
if ((EM>0) && (PF>0))
{
if (EM <= PF)
{
min4=EM;
}
if (PF<EM)
{
min4=PF;
}
}

if ((EM>0) && (PI>0))
{
if (EM <= PI)
{
min5=EM;
}
if (PI<EM)
{
min5=PI;
}
}

if ((EM>0) && (PV>0))
{
if (EM <= PV)
{

```

```

min6=EM;
}
if (PV < EM)
{
min6=PV;
}
}

//error alto
if ((EA>0) && (PF>0))
{
if (EA <= PF)
{
min7=EA;
}
if( PF<EA)
{
min7=PF;
}
}

if ((EA>0) && (PI>0))
{
if (EA <= PI)
{
min8=EA;
}
if (PI <EA)
{
min8=PI;
}
}

if ((EA>0) && (PV>0))
{
if (EA <= PV)
{
min9=EA;
}
if (PV<EA)
{
min9=PV;
}
}

//comparador bajo

```

```

if (minimol>=min2)
{
  if (minimol>=min4)
  {
    if (minimol>=min5)

      j=minimol;

    else
      j=min5;

  }
  else if (min4>=min5)
  {
    j=min4;
  }
  else
  {
    j=min5;
  }
}

```

```

if ( min2>=min4)
{
  if (min2>=min5)
    j=min2;
  else
    j=min5;
}
else if (min4>=min5)
{
  j=min4;
}
else
{
  j=min5;
}

```

```

// medio
if ( min3 >= min6)
{
  k=min3;
}
else
{
  k=min6;
}

```

```

//alto
if (min7>=min8)

```

```

    {
    if (min7>=min9)
    l=min7;
    else
    l=min9;
    }
else if (min8>=min9)
{
l=min8;
}
else
{
l=min9;
}

// formula de salida
fj=(-0.2*j)+0.2;
f1k=(0.2*k)+2.3;
f2k=(-0.2*k)+2.7;
f1= 4.8 + (0.2*1);

formulasalida=((f1*1)+(fj*j)+(f1k*k)+(f2k*k))/(1+j+k);

i=formulasalida*204.8;

if (error<=0)
{
i=0;
}
if (error>=afinacion)
{
i=1023;
}
afisnacion=afinacion* 20;
//visualizacion
asal= i*0.00489;
porsal=(asal* 20);
lcd_gotoxy(1,3); printf(lcd_putc,"Salida=%1.1fV",porsal);
herz= i*0.058651026;
lcd_gotoxy(2,4); printf(lcd_putc,"Frecuencia=%1.1f Hz",herz);
lcd_gotoxy(14,2); printf(lcd_putc,"A=%1.1f%",afisnacion);

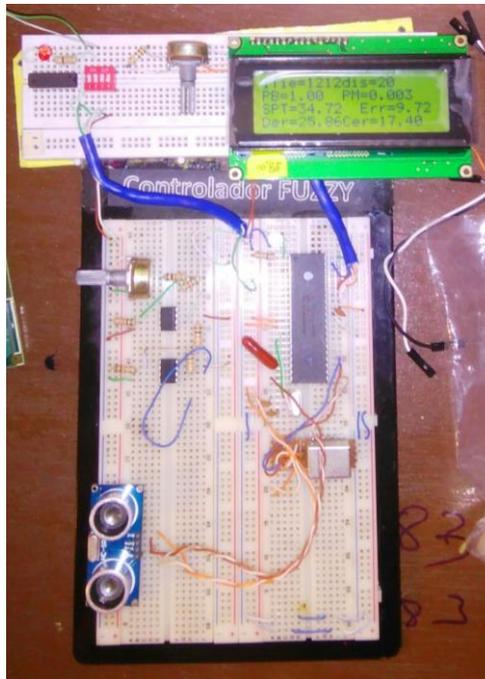
if (INPUT(PIN_c0))
{
printf(lcd_putc,"\f");
lcd_gotoxy(1,1); lcd_putc("Grados de Pertencia");
lcd_gotoxy(1,2); printf(lcd_putc,"EP=%1.2f",eb);
lcd_gotoxy(1,3); printf(lcd_putc,"EC=%1.2f",em);
lcd_gotoxy(1,4); printf(lcd_putc,"EN=%1.2f",ea);
lcd_gotoxy(10,2); printf(lcd_putc,"DP=%1.2f",pf);
}

```

```
    lcd_gotoxy(10,3); printf lcd_putc,"DC=%1.2f",pi);
    lcd_gotoxy(10,4); printf lcd_putc,"DN=%1.2f",pv);
    delay_ms(1000);
}
}
}
//Elaborado por: Paul Daza y Ricardo Rodríguez
```

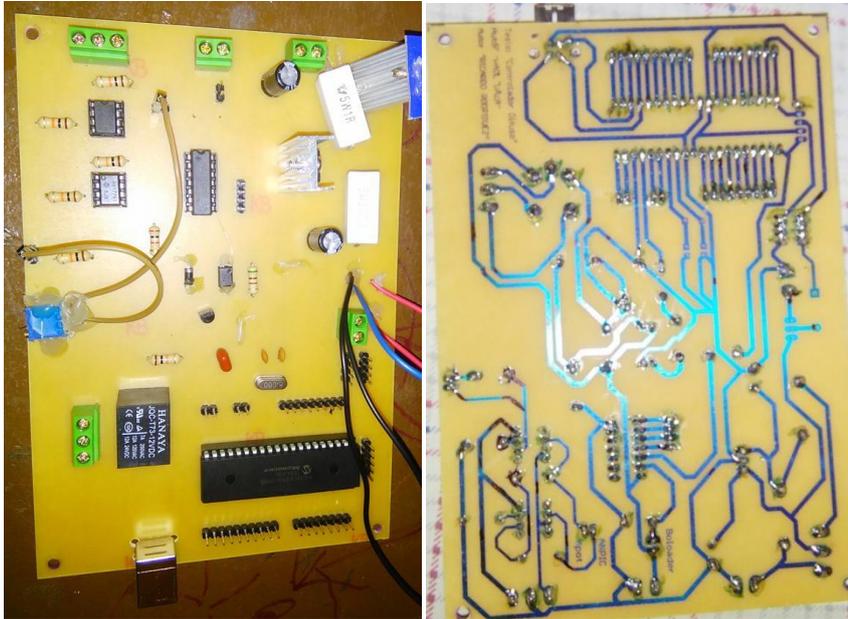
Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

Anexo 9: Pruebas efectuadas en protoboard



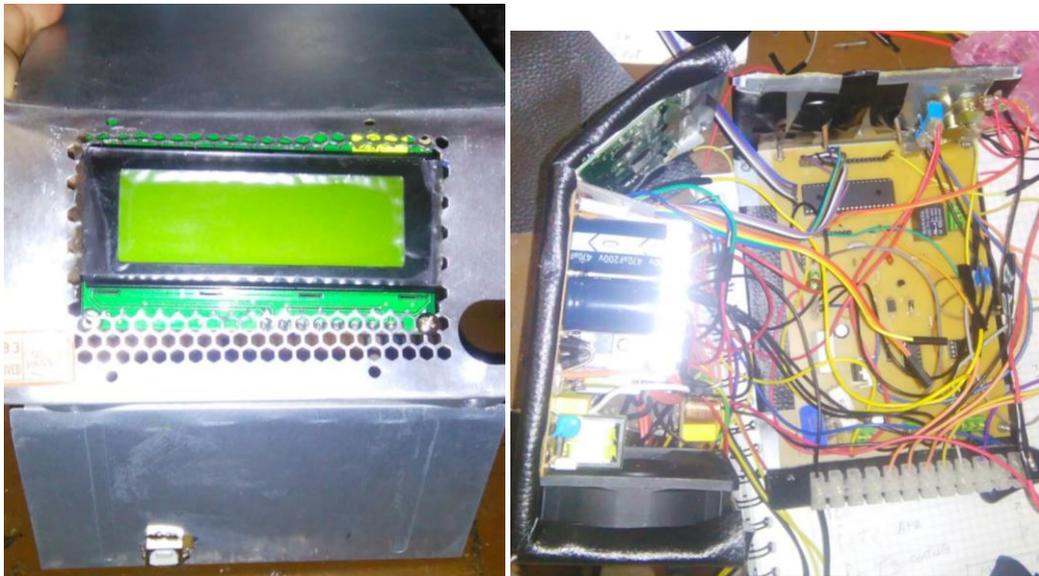
Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza).

Anexo 10: Tarjeta de control principal ensamblada.



Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

Anexo 11: Ensamblaje del módulo.



Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

Anexo 12: Funcionamiento del módulo en la planta.



Elaborado por: Los autores (Ricardo Rodríguez & Paúl Daza)

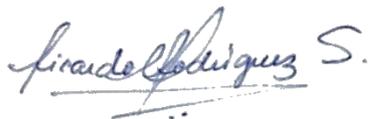
DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, Rodríguez Segura Ricardo Daniel, con C.C: # 0927790923 autor del trabajo de titulación: Estudio y diseño de un controlador difuso implementado en un módulo basado en microcontroladores, previo a la obtención del título de **INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 17 de marzo de 2016



f. _____
Nombre: Rodríguez Segura, Ricardo Daniel
C.C: 0927790923



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, Daza Barzola Paúl James, con C.C: # 0931157077 autor del trabajo de titulación: Estudio y diseño de un controlador difuso implementado en un módulo basado en microcontroladores, previo a la obtención del título de **INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 17 de marzo de 2016

f. _____

Nombre: Daza Barzola, Paúl James
C.C: 0931157077

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Estudio y diseño de un controlador difuso implementado en un módulo basado en microcontroladores		
AUTOR(ES) (apellidos/nombres):	Rodríguez Segura, Ricardo Daniel. Daza Barzola, Paúl James.		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES) (apellidos/nombres):	Herrera Muentes, Efrén Vinicio (Tutor). Suárez Murillo, Efraín Oswaldo (Revisor).		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo.		
CARRERA:	Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo.		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Electrónica en Control y Automatismo.		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	17 de marzo de 2016	No. DE PÁGINAS:	144
ÁREAS TEMÁTICAS:	Control de procesos. Automatización.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	LÓGICA DIFUSA, CONTROLADOR DIFUSO, CONTROLADOR PID, MICROCONTROLADORES.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>El presente trabajo de titulación explica minuciosamente el desarrollo del estudio y diseño de un módulo de control difuso basado en microcontroladores que tiene por finalidad controlar diferentes clases de procesos. La construcción del mismo es realizada con elementos de electrónica convencional y un microcontrolador con el propósito de presentar a los estudiantes y docentes de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil una alternativa viable de implementación de un controlador que reemplaza eficientemente a un PLC. Se diseña, previa a su construcción, la base del conocimiento del módulo por medio de la asignación de reglas de control elaboradas con lógica difusa. El punto de partida para estas es el control del nivel de agua de un tanque a través del manejo de una bomba con el fin de optimizar el trabajo de la misma. Se realiza el contraste de los valores obtenidos en las simulaciones electrónicas versus los registrados en la práctica para corroborar su funcionamiento correcto y luego se compara su tiempo de respuesta versus un PID realizado por un ex estudiante de la facultad. Se evidencia al final del proceso realizado que el controlador diseñado supera los resultados producidos por el controlador PID, además al verificar los resultados de las prácticas en el computador versus las reales se obtiene que una variación de 0.32V con respecto a la ideal. Se registra en los anexos un manual de uso del módulo de control para guiar a los usuarios de este en la reprogramación y control de nuevas variables.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593985806051 +593985156835	E-mail: ricardo.rdrs@hotmail.com p.james_93@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: Herrera Muentes, Efrén Vinicio		
	Teléfono: +593994023995		
	E-mail: efren.herrera@cu.ucsg.edu.ec / eherrera@espol.edu.ec		

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA

Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/123456789/232