



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

TEMA:

**Diseño de control difuso de temperatura para protección de motores  
DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y Software LabView**

AUTOR:

Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de  
**INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO**

TUTOR:

Philco Asqui, Luis Orlando

Guayaquil, Ecuador

22 de Septiembre del 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.  
**Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo** como requerimiento para la obtención  
del título de **INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO**.

TUTOR

---

Philco Asqui, Luis Orlando

DIRECTOR DE CARRERA

---

Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 22 del mes de Septiembre del año 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación “**Diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y Software LabView**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero Eléctrico Mecánico**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 22 del mes de Septiembre del año 2017

EL AUTOR

---

Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “**Diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y Software LabView**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 22 del mes de Septiembre del año 2017

EL AUTOR

---

Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo

# REPORTE DE URKUND

**URKUND**

<b>Documento</b>	<a href="#">Villalba Kevin FINAL 1.docx</a> (D30370443)
<b>Presentado</b>	2017-09-04 13:31 (-05:00)
<b>Presentado por</b>	fernandopm23@hotmail.com
<b>Recibido</b>	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
<b>Mensaje</b>	Análisis Urkund <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a>

1% de estas 21 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

Lista de fuentes	Bloques		
<input type="checkbox"/>	<b>Categoría</b>	<b>Enlace/nombre de archivo</b>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>		<a href="#">ANA BOLAÑOS.docx</a>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>		<a href="#">T-UCSG-PRE-TEC-IECA-2.pdf</a>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>		<a href="http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/...">http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/...</a>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<b>Fuentes alternativas</b>		
<input type="checkbox"/>	<b>La fuente no se usa</b>		

Reiniciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

TEMA: Diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y Software LabView

AUTOR: Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO

TUTOR: Philco Asqui, Luis Orlando

Guayaquil, Ecuador

22 de Septiembre del 2017

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

1 Advertencias

## DEDICATORIA

Mi trabajo de titulación se la dedico con todo mi amor y cariño a mis padres que día a día lucharon con mucho esfuerzo, dándome su apoyo incondicional, enseñándome que todo es un esfuerzo en la vida, con su ejemplo seguí este sueño que no fue fácil pero que hoy está realizado.

A mis amigos y cada persona que sumo con un granito de arena que quizás ya no está conmigo pero los recuerdo por todo su apoyo incondicional porque creyeron en mí en mis sueños a ellos se los dedico.

Paula Elizabeth pachucho Hernández

Luis Rodrigo Villalba Pachucho

A mis hermanos que son mi pilar fundamental para seguir luchando, mi motivación en todo momento de mi carrera, siempre dándome aliento para cumplir mi meta, demostrándome que siempre estarán conmigo en todo reto de mi vida los amo.

Genesis Maylin Villalba Pachucho

Kenny Ariel Villalba Pachucho

## EL AUTOR

Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo

## **AGRADECIMIENTO**

Primero a Dios por darme sabiduría y entendimiento durante toda esta etapa de mi vida y así poder lograr esta meta que se dio a base de esfuerzo y dedicatoria.

A mis padres que siempre estuvieron brindándome su apoyo incondicional en todas las situaciones difíciles de la carrera, a mi madre que es mi todo a ella le agradezco por todos los principios y valores inculcados en mi vida, por cada consejo que salía con mucha sabiduría, a ella que me enseñó que todo se logra con esfuerzo que nada es fácil y por toda su confianza brindada.

**EL AUTOR**

Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**ING. MIGUEL ARMANDO HERAS SÁNCHEZ, M. Sc.**  
DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**ING. LUIS ORLANDO PHILCO ASQUI, M. Sc.**  
COORDINADOR DE ÁREA

f. \_\_\_\_\_

**ING. EDWIN FERNANDO PALACIOS MELÉNDEZ, M. Sc.**  
OPONENTE

## Índice General

Índice de Figuras .....	XI
Resumen .....	XV
CAPÍTULO 1: Descripción general del Trabajo de Titulación .....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes del problema a investigar. ....	3
1.3. Definición del problema a investigar.....	4
1.4. Justificación del problema a investigar. ....	4
1.5. Objetivos del problema a investigar. ....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos específicos:.....	5
1.6. Hipótesis.....	5
1.7. Metodología de Investigación.....	6
CAPÍTULO 2: Fundamentación Teórica. ....	9
2.1. Introducción de motores eléctricos.....	9
2.2. Motores eléctricos DC. ....	9
2.2.1. Motor DC con escobillas.....	11
2.2.2. Motor DC paso a paso.....	12
2.2.3. Motor PMDC.....	14
2.2.4. Motor PCB.....	19
2.3. Motor de corriente continua de excitación separada. ....	21
2.4. Control de velocidad de motores DC utilizando microcontroladores. .	23
2.5. Controladores convencionales. ....	24
2.5.1. Controlador Proporcional-Integral (PI).....	25
2.5.2. Controlador Proporcional-Derivativo (PD). ....	26
2.5.3. Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). ....	27
2.6. Controlador de lógica difusa.....	29

2.6.1. Función de pertenencia difusa.....	29
2.6.2. Estructura del sistema de lógica difusa. ....	30
2.6.3. Principio de lógica difusa. ....	32
CAPÍTULO 3: Aportación del Trabajo de Titulación.....	33
3.1. Introducción a LabView 2013. ....	33
3.2. Herramienta para diseñar sistemas de control difuso. ....	33
3.3. Diseño de funciones de entrada de pertenencia para control difuso. .	37
3.4. Diseño de funciones de salida de pertenencia para control difuso.....	41
3.5. Diseño de reglas de la función de pertenencia para control difuso. ...	44
3.6. Configuración del sistema de prueba de la función de pertenencia para control difuso. ....	46
3.7. Programación del sistema de control difuso.....	46
3.8. Adquisición de datos del sistema de control difuso. ....	65
3.9. Interfaz gráfica de usuario del sistema de control difuso.....	72
CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones. ....	74
4.1. Conclusiones.....	74
4.2. Recomendaciones.....	74
Bibliografía.....	75

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

Figura 2. 1: Tipos principales de motores eléctricos. ....	9
Figura 2. 2: Motor convencional DC con escobillas. ....	11
Figura 2. 3: Motor paso a paso unipolar de dos fases. ....	12
Figura 2. 4: Diagrama transversal de un motor paso a paso de reluctancia trifásico, (a) dientes del estator y rotor, (b) disposición de devanado. ....	13
Figura 2. 5: Diagrama transversal de un motor paso a paso de reluctancia trifásico, (a) dientes del estator y rotor, (b) disposición de devanado. ....	14
Figura 2. 6: Motores DC de imanes permanentes sin escobillas y colector. ....	15
Figura 2. 7: Compresor de enfriador centrífugo con PMDC sin escobillas de alta velocidad y cojinetes magnéticos: (1) rotor con superficie PM y lata no magnética, (2) estator, (3) rodamiento magnético radial, (4) rodamiento magnético axial, (5) impulsor, (6) eje. ....	16
Figura 2. 8: Escáner de código de barras: (1) láser, (2) fotodecoder que convierte el rayo láser en señal eléctrica, (3) PMDC sin escobillas, (4) disco holográfico de tres capas, (5) espejo, (6) código de barras, (7) objeto escaneador, (8) ventana de escaneo, (9) carcasa. ....	17
Figura 2. 9: Juguete de transbordador espacial: (1) PMDC colector, (2) transmisión, (3) interruptor On/Off, (4) batería de 1.5 V, (5) ruedas de motores. ....	18
Figura 2. 10: Unidad de disco duro (HDD) de computadora con PMDC sin escobillas: (1) en el eje PMDC sin escobillas montado en disco 2.5", (2) controlador de interface/accionamiento integrado, (3) actuador rotativo equilibrado de la bobina móvil, (4) actuador PM, (5) cabezales de lectura/escritura, (6) preamplificador de lectura/escritura, (7) conector de 44 pines. ....	18
Figura 2. 11: Motor de circuito impreso. ....	20
Figura 2. 12: Modelo de motor de corriente continua excitado por separado. ....	21
Figura 2. 13: Diagrama de bloques del controlador PI con control vectorial. ....	26

Figura 2. 14: Diagrama de bloques del controlador PD con control vectorial.	27
Figura 2. 15: Diagrama de bloques del controlador PID.	28
Figura 2. 16: Tipos de funciones de pertenencia difusa: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiano, y (d) campana generalizada.	30
Figura 2. 17: Diagrama de bloques básico de controlador de lógica difusa.	31
Figura 2. 18: Diagrama de bloques de un sistema de control difuso.	32

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Software utilizado para el proyecto	33
Figura 3. 2: Herramienta para el control Difuso.	34
Figura 3. 3: Icono de la herramienta de adquisición de datos.	34
Figura 3. 4: Ventana de inicio del programa.	35
Figura 3. 5: Ventana para crear un nuevo proyecto.	36
Figura 3. 6: Creación de un archivo VI.	36
Figura 3. 7: Ventanas para la programación.	37
Figura 3. 8: Ventana de configuración del sistema.	38
Figura 3. 9: Creación de la entrada de error.	38
Figura 3. 10: Creación de la función de pertenencia Zero.	39
Figura 3. 11: Función de pertenencia TMB (color rojo).	39
Figura 3. 12: Función de pertenencia TSB (color morado oscuro).	40
Figura 3. 13: Función de pertenencia TMA (color lila).	40
Figura 3. 14: Función de pertenencia TSA (color naranja).	41
Figura 3. 15: Configuración de la salida Out.	41
Figura 3. 16: Función de pertenencia CP (color rojo).	42
Figura 3. 17: Función de pertenencia CN (color negro).	42
Figura 3. 18: Función de pertenencia CB (color rosado).	42
Figura 3. 19: Función de pertenencia CM (color lila).	43
Figura 3. 20: Función de pertenencia CC (color marrón).	43
Figura 3. 21: Así luce la venta con las funciones de membresía.	44
Figura 3. 22: Ventana de reglas.	44
Figura 3. 23: Creación de la primera regla.	45
Figura 3. 24: Todas las reglas están establecidas.	45

Figura 3. 25: Gráfica de la relación entrada/salida.....	46
Figura 3. 26: Ventana de herramientas del Front Panel. ....	47
Figura 3. 27: Paleta de herramientas numéricas. ....	47
Figura 3. 28: Selección de Indicador numérico.....	48
Figura 3. 29: Herramienta Boolean y Square LED.....	48
Figura 3. 30: Botón de Stop. ....	49
Figura 3. 31: Control de Gráficas y selección de waveform chart.....	49
Figura 3. 32: Ventana de propiedades del Waveform.....	50
Figura 3. 33: Selección del formato de visualización. ....	50
Figura 3. 34: Ventana de propiedades pestaña Plots. ....	51
Figura 3. 35: Pestaña Scale.....	51
Figura 3. 36: Strip Path y Build Path. ....	52
Figura 3. 37: Ubicación de la herramienta Current VI. ....	53
Figura 3. 38: Conexión del Current VI.....	53
Figura 3. 39: Creación de la constante. ....	53
Figura 3. 40: Ubicación de la herramienta FL Load Fuzzy y FL Fuzzy Control. .....	54
Figura 3. 41: Interconexión entre los elementos Fuzzy y SISO. ....	54
Figura 3. 42: Ubicación de la operación resta.....	55
Figura 3. 43: Gráfica de la conexión. ....	55
Figura 3. 44: Ubicación del DAQ Assistant. ....	56
Figura 3. 45: Ventana de configuración del DAQ.....	56
Figura 3. 46: Configuración del DAQ. ....	57
Figura 3. 47: Asignación del canal.....	57
Figura 3. 48: Ventana de propiedades.....	58
Figura 3. 49: Icono del DAQ. ....	58
Figura 3. 50: Icono del multiplicador. ....	58
Figura 3. 51: Ubicación del signal manipulation.....	59
Figura 3. 52: Conexión de las herramientas del DAQ.....	59
Figura 3. 53: Ubicación de la variable local. ....	60
Figura 3. 54: Asignación de la variable.....	60
Figura 3. 55: Gráfica de la estructura While completa. ....	60
Figura 3. 56: Ubicación y gráfica de las estructuras Case y While. ....	61
Figura 3. 57: Agregación de un marco.....	61

Figura 3. 58: Configuración variable locales .....	62
Figura 3. 59: Ubicación del Timing.....	62
Figura 3. 60: Ubicación y configuración de la herramienta Stop.....	62
Figura 3. 61: Pulsante Stop en la estructura Case.....	63
Figura 3. 62: Segmento terminado para tercera estructura Case. ....	63
Figura 3. 63: Estructura con variable local.....	64
Figura 3. 64: Cambio de variable a lectura. ....	64
Figura 3. 65: Configuración de la estructura. ....	64
Figura 3. 66: Estructura finalizada. ....	65
Figura 3. 67: Configuración del DAQ 2. ....	65
Figura 3. 68: Ventana de configuración del DAQ de la variable "Foco". .....	66
Figura 3. 69: Ventana de configuración y activación de casilla de la DAQ 2. .....	66
Figura 3. 70: Icono del DAQ Assistant. ....	67
Figura 3. 71: Ubicación de la herramienta del convertidor.....	67
Figura 3. 72: Ventana de propiedades del convertidor. ....	68
Figura 3. 73: Icono de configuración del DAQ 2. ....	68
Figura 3. 74: Asignación de una variable local en la DAQ 2. ....	68
Figura 3. 75: Configuración del tercer DAQ.....	69
Figura 3. 76: Asignación del puerto del DAQ.....	69
Figura 3. 77: Icono del DAQ terminado.....	69
Figura 3. 78: Asignación de variable local al DAQ 3.....	70
Figura 3. 79: Configuración del DAQ 3 del motor. ....	70
Figura 3. 80: Asignación del puerto del DAQ 3 del motor. ....	70
Figura 3. 81: Ventana de configuración y activación de casilla de la DAQ 3. .....	71
Figura 3. 82: Estructura de adquisición de datos (DAQ) del control difuso..	71
Figura 3. 83: VI programado para el proceso de control difuso. ....	72
Figura 3. 84: GUIDE para el proceso de control difuso.....	73

## Resumen

El presente trabajo de titulación consiste diseñar un sistema de control difuso de temperatura para la protección de motores DC utilizando la tarjeta de adquisición de datos DAQ a través de instrumentos virtuales en LabView. En la parte introductoria se especifican los antecedentes del problema a investigar a través de dos trabajos relacionados a los controladores difusos, así como la definición del problema a investigar, objetivo general, objetivos específicos, hipótesis y la metodología a utilizar en el desarrollo del trabajo de titulación. En la fundamentación teórica, se describen los elementos que fueron utilizados en el diseño del sistema de control difuso, tales como, motores eléctricos DC y AC, controladores PI-PD-PID y controladores de lógica difusa. La demostración experimental del diseño realizado en LabView del controlador difuso de temperatura para protección de motores DC se utilizan la tarjeta de adquisición de datos DAQ y la planta EPC de National Instrument. El método propuesto incorpora la lógica difusa a través de la herramienta incorporada en LabView. Este método utilizado permitió mejorar la respuesta de protección de motores DC.

**Palabras clave:** MOTORES, DC, AC, CONTROLADORES, DIFUSO, DAQ

## **CAPÍTULO 1: Descripción general del Trabajo de Titulación**

### **1.1. Introducción.**

Un sistema de control difuso es un sistema de control basado en la lógica difusa. La lógica difusa es un sistema matemático que analiza los valores de entrada analógica en términos de variables lógicas que toma valores continuos entre 0 y 1, en contraste con la lógica clásica o digital, que opera en valores discretos de 1 o 0 (verdadero o falso respectivamente). La lógica difusa es ampliamente utilizada en el control de máquinas eléctricas. El término "difuso" se refiere al hecho de que la lógica involucrada puede tratar con conceptos que no pueden expresarse como "verdaderos" o "falsos", sino como "parcialmente verdaderos". (Kadam & Patki, 2016)

Aunque en muchos casos los enfoques alternativos como los algoritmos genéticos y las redes neuronales pueden funcionar tan bien como la lógica difusa, la lógica difusa tiene la ventaja de que la solución al problema puede expresarse en términos que los operadores humanos puedan entender, de modo que su experiencia pueda ser utilizado en el diseño del controlador. Esto hace que sea más fácil mecanizar las tareas que ya se han realizado con éxito por los seres humanos.

En general, las técnicas de modelado de sistemas convencionales sugieren construir un modelo utilizando los datos de entrada-salida disponibles basados en el conocimiento empírico o físico sobre sistemas; que conducen a la determinación de un conjunto de ecuaciones matemáticas. Este

tipo de enfoques es eficaz sólo cuando el sistema es relativamente simple y matemáticamente bien definido. Además de que la mayoría de los problemas del mundo real en el control no obedecen a reglas matemáticas simples, idealizadas y subjetivas. La lógica difusa es una metodología de sistema de control de resolución de problemas que puede implementarse en hardware, software o una combinación de ambos. Proporciona una manera sencilla de llegar a una conclusión definitiva basada en información vaga, ambigua, imprecisa, ruidosa o falta de información.

## **1.2. Antecedentes del problema a investigar.**

Durante la parte investigativa del trabajo de titulación, se pudo constatar de varios artículos y trabajos relacionados a los controladores difusos. A continuación, se especifican algunos trabajos:

- El trabajo realizado por Elmahi, (2015) presenta una visión general del control de la lógica difusa basado en la estabilidad del sistema de energía eléctrica y un esfuerzo considerable dirigido al proceso del sistema de control de desarrollo. Este trabajo de revisión sobre la lógica difusa desarrolla el alcance de la implementación de la lógica difusa en aplicaciones de control de procesos para mejorar la eficiencia de la estabilidad del sistema de energía eléctrica.
- El artículo de Merigó, Gil-Lafuente, & Yager, (2015) presenta una visión general de la investigación en las ciencias difusas utilizando indicadores bibliométricos. La principal ventaja es que estos indicadores proporcionan un panorama general, identificando algunas de las investigaciones más influyentes en esta área. El análisis se divide en

secciones clave enfocadas en revistas relevantes, artículos, autores, instituciones y países. El objetivo del trabajo es informativo, y estos indicadores identifican la mayor parte de la investigación fundamental en este campo.

### **1.3. Definición del problema a investigar.**

Necesidad de diseñar un sistema de control difuso para la protección de motores DC utilizando la plataforma de simulación LabView y la tarjeta de adquisición de datos Daq 6009.

### **1.4. Justificación del problema a investigar.**

En los últimos años las aplicaciones de las técnicas de inteligencia artificial se han utilizado para convertir la experiencia humana en una forma comprensible por las computadoras. El control avanzado basado en técnicas de inteligencia artificial se llama control inteligente. Los sistemas inteligentes se describen generalmente por analogías con sistemas biológicos, por ejemplo, observando cómo los seres humanos realizan tareas de control, reconocen patrones o toman decisiones.

Existe un desajuste entre los seres humanos y las máquinas: los seres humanos razonan de manera incierta, imprecisa y difusa, mientras que las máquinas y los ordenadores que las ejecutan se basan en el razonamiento binario. La lógica difusa es una manera de hacer las máquinas más inteligentes que les permiten razonar de una manera difusa como los seres humanos. La lógica difusa, propuesta por Lotfy Zadeh en 1965, surgió como

una herramienta para lidiar con problemas de toma de decisiones inciertos, imprecisos o cualitativos.

Los controladores que combinan técnicas inteligentes y convencionales se usan comúnmente en el control inteligente de sistemas dinámicos complejos. Por lo tanto, los controladores borrosos incrustados automatizan lo que tradicionalmente ha sido una actividad de control humano.

## **1.5. Objetivos del problema a investigar.**

### **1.5.1. Objetivo General.**

Evaluar el diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y Software LabView

### **1.5.2. Objetivos específicos:**

- Describir los fundamentos teóricos de motores eléctricos DC y de control difuso.
- Diseñar el sistema de control difuso sobre la plataforma LabView
- Evaluar el sistema de control difuso utilizando la tarjeta de adquisición de datos Daq 6009.

## **1.6. Hipótesis.**

Las estrategias de control difusas provienen de experiencias y experimentos más que de modelos matemáticos y, por lo tanto, las implementaciones lingüísticas son mucho más rápidas. Las estrategias de

control difuso implican un gran número de insumos, la mayoría de los cuales son relevantes sólo para otras condiciones especiales. Tales entradas se activan sólo cuando prevalece la condición relacionada. De esta manera, se requiere poca sobrecarga computacional adicional para agregar reglas adicionales. Como resultado, la estructura de la base de reglas permanece comprensible, llevando a una codificación eficiente ya la documentación del sistema.

### **1.7. Metodología de Investigación.**

Para el diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC se utiliza un enfoque de control tradicional, es decir, que se requiere modelar la realidad física. Se pueden utilizar tres métodos en la descripción de un sistema:

- **Método experimental:** mediante la experimentación y la determinación de cómo reacciona el proceso a diversas entradas se puede caracterizar una tabla de entrada-salida. Gráficamente el método es equivalente a trazar algunos puntos discretos de la curva de entrada-salida, usando el eje horizontal para la entrada y el eje vertical para la salida. Al entender dicha reacción de entrada y salida, se puede diseñar un controlador.

Las desventajas son varias: el equipo de proceso puede no estar disponible para la experimentación, el procedimiento sería generalmente muy costoso, y para un gran número de valores de entrada es impráctico medir la salida y la interpolación entre salidas medidas sería requerida. También hay que tener cuidado de determinar los rangos esperados de

entradas y salidas para asegurarse de que están dentro del rango de los instrumentos de medición disponibles.

- **Modelo matemático:** la ingeniería de control requiere un modelo matemático idealizado del proceso controlado, generalmente en forma de ecuaciones diferenciales o de diferencias. Las transformadas de Laplace y las transformadas de z se utilizan respectivamente. Para hacer los modelos matemáticos lo suficientemente simples, se hacen ciertas suposiciones, una de las cuales es que el proceso es lineal, es decir, su salida es proporcional a la entrada.

Las técnicas lineales son valiosas porque proporcionan una buena comprensión. Además, no existe una teoría general para la solución analítica de las ecuaciones diferenciales no lineales y, en consecuencia, no hay herramientas completas de análisis para sistemas dinámicos no lineales. Otra hipótesis es que los parámetros del proceso no cambian en el tiempo (es decir, el sistema es invariable en el tiempo) a pesar del deterioro del componente del sistema y los cambios ambientales.

Los siguientes problemas surgen al desarrollar una descripción matemática significativa y realista de un proceso industrial: (1) fenómenos mal entendidos, (2) valores inexactos de varios parámetros, (3) complejidad del modelo.

- **Método Heurístico:** el método heurístico consiste en modelar y entender de acuerdo con la experiencia previa, las reglas generales y las estrategias de uso frecuente. Una regla heurística es una implicación lógica de la forma: If <condición> Then <consecuencia>, o en una situación de control típica: If <condición> Then <acción>. Las reglas asocian las conclusiones con las condiciones. Por lo tanto, el método heurístico es en realidad similar al método experimental de construir tablas de entradas y valores de salida correspondientes donde en lugar de tener valores numéricos nítidos de las variables de entrada y salida, se utilizan valores difusos: IF voltaje\_entrada=grande THEN voltaje\_salida=mediano. Las ventajas del método heurístico son: (1) No se requiere el supuesto de linealidad y, (2) las reglas heurísticas pueden integrarse a las estrategias de control de los operadores humanos.

## CAPÍTULO 2: Fundamentación Teórica.

El presente capítulo se describe la fundamentación teórica con la que se basa el desarrollo del trabajo de titulación, que incluye la descripción de motores eléctricos DC y controladores de motores.

### 2.1. Introducción de motores eléctricos.

Hay dos tipos principales de motores eléctricos. Existen motores de corriente continua o directa (*Direct Current, DC*) y motor de corriente alterna (*Alterne Current, AC*). La referencia de DC y AC se refiere a cómo se transfiere la corriente eléctrica a través y desde el motor. Ambos tipos de motores tienen diferentes funciones y aplicaciones. Los motores DC o CC vienen en dos tipos generales. Con cepillos y sin escobillas (motor síncrono). Entonces, el motor AC viene en dos tipos, que es monofásico y trifásico. Aunque, hay motores DC que son monofásicos. En la figura 2.1 se muestran dos tipos sencillos de motores eléctricos DC y AC.



Figura 2. 1: Tipos principales de motores eléctricos.  
Fuente: (BTW, 2016)

### 2.2. Motores eléctricos DC.

Hay muchos tipos de motor de corriente continua que están disponibles, tales como: motores con escobillas (brushes), motor paso a paso, motores DC de imán permanente (PMDC), motor de circuito impreso (PCB) y otros. Estos motores tienen sus propias ventajas y desventajas, y se utilizan en diferentes

aplicaciones. Existen varios tipos de motores de corriente continua que están disponibles.

En la tabla 2.1 se muestran ventajas, desventajas y otra información básica de los motores paso a paso, con bobina de campo y de imán permanente.

Tabla 2. 1: Ventajas y desventajas de varios tipos de motor de corriente continua.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Motor DC paso a paso	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Velocidad y precisión, muy precisas</li> <li>✓ Control de posición.</li> <li>✓ Alto par a baja velocidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Caro y difícil de encontrar.</li> <li>✓ Requiere un circuito de control de conmutación.</li> </ul>
Motor de DC con bobina de campo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Amplia gama de velocidad y par.</li> <li>✓ Más potente que los motores de imanes permanentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Requieren más corriente que los motores de imanes permanentes, dado que la bobina de campo debe estar energizada.</li> <li>✓ Generalmente más altos que los motores de imanes permanentes.</li> <li>✓ Más difícil de obtener.</li> </ul>
Motor DC de imán permanente	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pequeño.</li> <li>✓ Compacto.</li> <li>✓ Fácil de encontrar.</li> <li>✓ Muy barato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Generalmente pequeño.</li> <li>✓ No puede variar el campo magnético.</li> <li>✓ Fuerza.</li> </ul>

Fuente: (Intplus, 2017; Zuñiga Murillo, 2014)

Hay otros tipos de motor de corriente continua que tienen sus propias ventajas y desventajas. La variedad de tipos de motores de corriente continua ofrece una variedad de métodos de control y también la variedad de aplicaciones que se pueden realizar. En conclusión, los motores de corriente continua tienen muchos tipos y difieren entre sí en las características del motor y también el uso del motor en los aparatos.

### 2.2.1. Motor DC con escobillas.

En la figura 2.2 se muestra el motor convencional DC con escobillas, en la que se observa el devanado de campo, conductores de armadura, escobillas (brushes) y conmutador. Este tipo de motor eléctrico es muy utilizado en drones y batallas de robots (Warbot) y su uso dependerá del tipo de controlador o puente H que pueda resistir la corriente máxima de funcionamiento.

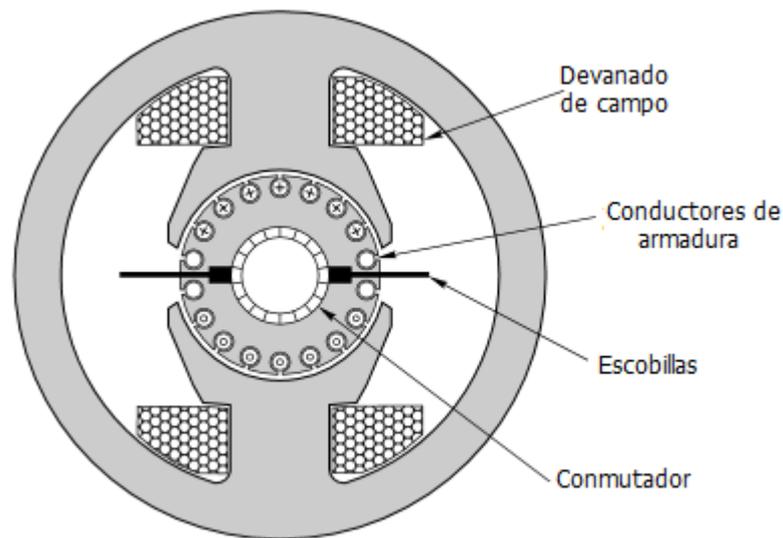


Figura 2. 2: Motor convencional DC con escobillas.  
Fuente: (Hughes, 2006)

Las aplicaciones según Hughes, (2006) van desde laminadores de acero, tracción ferroviaria, hasta una amplia gama de accionamientos industriales, robótica, impresoras y servos de precisión. La gama de salidas de potencia es correspondientemente amplia, desde varios megavatios en el extremo superior hasta sólo unos pocos vatios, pero a excepción de algunos de los pequeños de bajo rendimiento, como los utilizados en los juguetes, todos tienen la misma estructura básica, tal como se mostró en la figura 2.2.

### 2.2.2. Motor DC paso a paso.

El motor paso a paso tiene un control muy preciso de la velocidad y de la posición, él también tiene par alto en la velocidad baja. Pero en la mano, los motores paso a paso son caros y difíciles de encontrar. También requiere circuito de control de conmutación. En la figura 2.3 se muestra el motor paso a paso unipolar vendido por Intplus, (2017). Existen dos tipos de motores de paso a paso, unipolar y bipolar.



Figura 2. 3: Motor paso a paso unipolar de dos fases.  
Fuente: (Intplus, 2017; Zuñiga Murillo, 2014)

El motor paso a paso de acuerdo a Bin Muain, (2010) llenó un nicho único en el mundo del control del motor. Estos motores se utilizan principalmente en aplicaciones de medición y control. Las aplicaciones de ejemplo incluyen impresoras de inyección de tinta, máquinas CNC y bombas volumétricas. Varias características comunes a todos los motores paso a paso los hacen idóneos para este tipo de aplicaciones. Los motores paso a paso son sin escobillas.

En la figura 2.4 se muestra la estructura básica de un motor paso a paso de reluctancia variable. Este motor tiene un estator con seis dientes y un rotor con cuatro dientes y ambas partes están hechas de acero con alta permeabilidad permitiendo alto flujo magnético que fluye a través de la

estructura. El estator se enrolla en una disposición trifásica como se muestra en la figura 2.4 (b). Cada fase (A, B o C) conecta dos dientes del estator opuestos en serie e induce un flujo magnético dirigido a lo largo del diámetro cuando se excita.

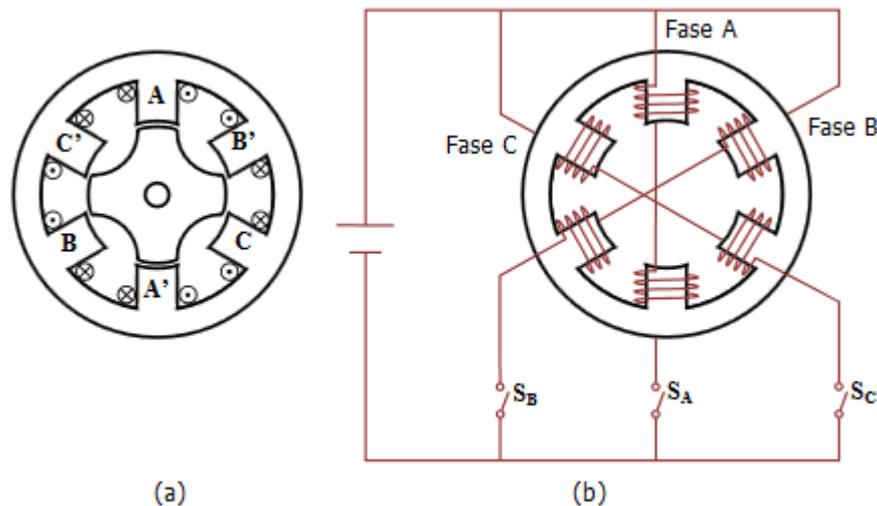


Figura 2. 4: Diagrama transversal de un motor paso a paso de reluctancia trifásico, (a) dientes del estator y rotor, (b) disposición de devanado.

Fuente: (Bin Muain, 2010)

En una configuración simplificada, cada fase del estator se conecta a la fuente de alimentación de CC a través de un conmutador. Las fases del estator se activan; en términos técnicos “excitados”; en una secuencia mediante el control de los conmutadores. El funcionamiento básico del motor se basa en el principio de que el rotor se alinea con la posición en la que la reluctancia magnética es mínima y el flujo magnético producido es máximo. Esta posición se denomina posición de equilibrio o posición de reposo.

En la figura 2.5 (a) se muestra la posición de reposo del rotor cuando sólo se excita el devanado de fase A. El rotor está magnetizado y alineado con las líneas de flujo. Si la excitación cambia de fase A hasta la fase B, la magnetización del rotor cambia con nuevas líneas de flujo. Con el fin de

reducir el entrehierro en el que se produce el flujo magnético y reducir la tensión de Maxwell, el rotor comienza a moverse en sentido antihorario hacia una posición con menor reluctancia como se muestra en la figura 2.5 (b) y finalmente alcanza la posición de reposo como se muestra en la figura 2.5 (c).

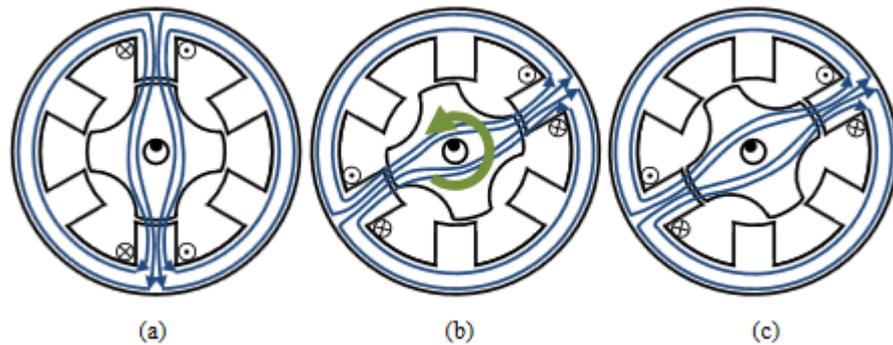


Figura 2. 5: Diagrama transversal de un motor paso a paso de reluctancia trifásico, (a) dientes del estator y rotor, (b) disposición de devanado.

Fuente: (Bin Muain, 2010)

### 2.2.3. Motor PMDC.

Para el motor de PMDC, es más pequeño puesto que los devanados de campo son substituidos por el imán permanente y también son más baratos. La ausencia de la bobina de campo, así como los resultados de la pérdida de cobre y esto aumenta la eficiencia. Pero los motores PMDC también tienen varias desventajas. Existe el riesgo de desmagnetización, que puede ser causada por una corriente de armadura excesiva o un calentamiento excesivo si el motor está sobrecargado durante un período prolongado de tiempo. La velocidad del motor PMDC no puede ser controlada por el flujo de campo y por lo tanto el control de velocidad debe ser alcanzado cambiando el voltaje del inducido. Por lo tanto, estos motores sólo se utilizan cuando se requieren velocidades del motor por debajo de la velocidad de base. No ofrecen la flexibilidad de operación más allá de la velocidad base.

Existen dos tipos de motores PMDC, que son: PMDC sin escobillas y PMDC colector. La figura 2.6 muestra la comparación de los motores PMDC sin escobillas y colector.

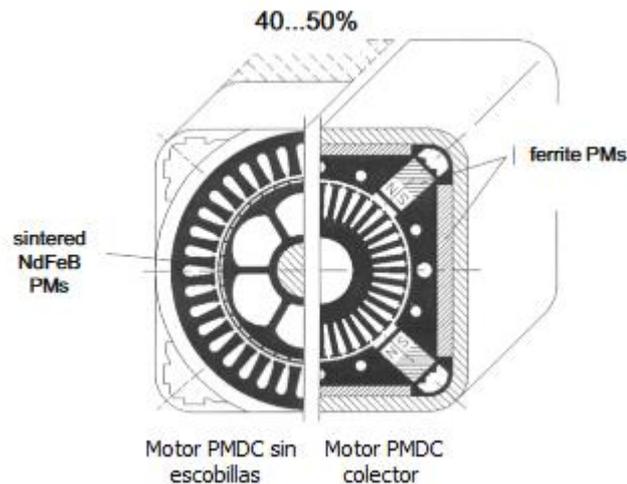


Figura 2. 6: Motores DC de imanes permanentes sin escobillas y colector.  
Fuente: (Gieras, 2010)

Para los motores PMDC sin escobillas, la corriente del inducido tiene una forma de onda cuadrada (trapezoidal), sólo dos devanados de fase (para conexión Y) conducen la corriente al mismo tiempo, y el patrón de conmutación se sincroniza con la posición angular del rotor (conmutación electrónica). (Gieras, 2010)

Las aplicaciones de imanes permanentes incluyen las siguientes áreas de uso: (Gieras, 2010)

#### **a. Industrial.**

- Accionamientos industriales, por ejemplo: bombas, ventiladores, sopladores, compresores (véase la figura 2.7), centrifugadoras, molinos, polipastos, sistemas de manipulación, etc.
- Servomotores.

- Procesos de automatización
- Sistemas de transporte interno
- Robots

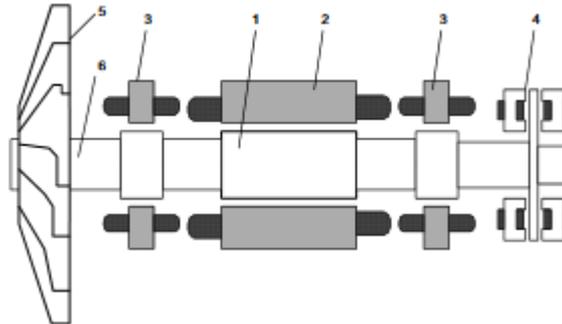


Figura 2. 7: Compresor de enfriador centrífugo con PMDC sin escobillas de alta velocidad y cojinetes magnéticos: (1) rotor con superficie PM y lata no magnética, (2) estator, (3) rodamiento magnético radial, (4) rodamiento magnético axial, (5) impulsor, (6) eje.

Fuente: (Gieras, 2010)

#### **b. Público.**

- Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (*Heating Ventilating and Air Conditioning, HVAC*).
- Equipamiento para catering.
- Máquinas de lavandería de monedas.
- Máquinas de cajeros automáticos en bancos.
- Máquinas expendedoras automáticas.
- Cambiadoras de dinero.
- Máquinas de venta de billetes.
- Escáneres de código de barras en los supermercados (ver figura 2.8).
- Sistemas de control ambiental.
- Relojes.
- Equipos para parques de diversiones.

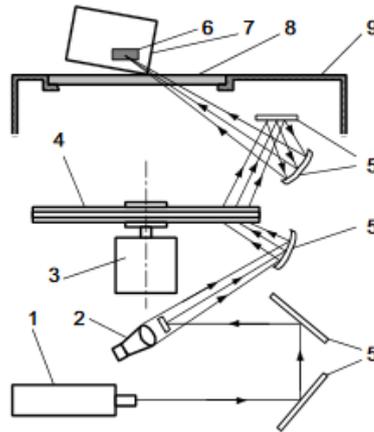


Figura 2. 8: Escáner de código de barras: (1) láser, (2) fotodecoder que convierte el rayo láser en señal eléctrica, (3) PMDC sin escobillas, (4) disco holográfico de tres capas, (5) espejo, (6) código de barras, (7) objeto escaneador, (8) ventana de escaneo, (9) carcasa.

Fuente: (Gieras, 2010)

### c. Doméstico.

- Equipos de cocina (refrigeradores, hornos de microondas, trituradores de basura en el fregadero, lavaplatos, mezcladores, parrillas, etc.)
- Equipos de baño (afeitadoras, secadores de pelo, cepillos de dientes, aparatos de masaje)
- Lavadoras y secadoras de ropa.
- Sistemas HVAC, humidificadores y deshumidificadores.
- Aspiradoras.
- Cortadoras de césped.
- Bombas (pozos, piscinas, jacuzzis de hidromasaje).
- Juguetes (véase la figura 2.9).
- Equipos de video y sonido.
- Cámaras.
- Teléfonos celulares.
- Sistemas de seguridad (puertas de garaje automáticas, puertas automáticas).

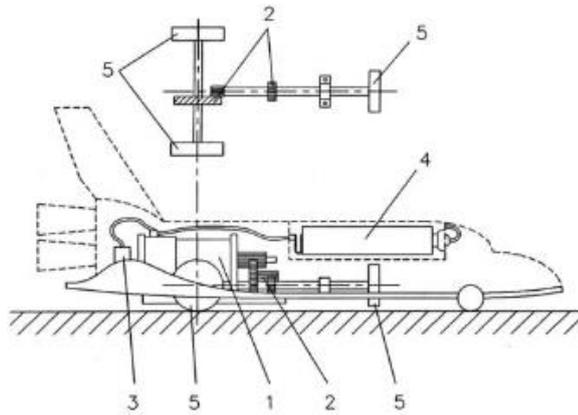


Figura 2. 9: Juguete de transbordador espacial: (1) PMDC colector, (2) transmisión, (3) interruptor On/Off, (4) batería de 1.5 V, (5) ruedas de motores.  
Fuente: (Gieras, 2010)

#### d. Equipos informáticos y oficina.

- Ordenadores.
- Unidad de discos duro (véase la figura 2.10).
- Impresoras.
- Plotters.
- Escáneres.
- Fotocopiadoras.
- Ayudas audiovisuales.

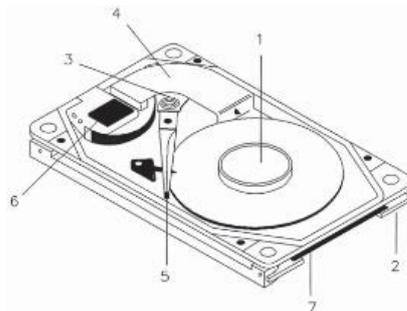


Figura 2. 10: Unidad de disco duro (HDD) de computadora con PMDC sin escobillas: (1) en el eje PMDC sin escobillas montado en disco 2.5", (2) controlador de interfaz/accionamiento integrado, (3) actuador rotativo equilibrado de la bobina móvil, (4) actuador PM, (5) cabezales de lectura/escritura, (6) preamplificador de lectura/escritura, (7) conector de 44 pines.  
Fuente: (Gieras, 2010)

#### e. Automóviles con motores de combustión.

#### f. Transporte.

- Ascensores y escaleras mecánicas.
- Transporte de personas.
- Ferrocarriles y tranvías.
- Vehículos eléctricos de transporte urbano e interprovincial.
- Aviones de control de vuelo de accionamiento de superficies.
- Buques eléctricos
- Barcos eléctricos
- Aeronaves eléctricas.

**g. Entre otras.**

**2.2.4. Motor PCB.**

El motor de la placa de circuitos impresos (*Printed Circuit Board, PCB*), con imán permanente, tiene una configuración radicalmente diferente de la del motor CC convencional. El bobinado de la armadura entera y el conmutador se imprimen en el disco del PCB (rotor). Este tipo de motor tiene varias ventajas tales como alto par que le permite acelerar y desacelerar rápidamente. El motor puede acelerar de 0 a 4000 rpm en 10 milisegundos. El motor no tiene par de giro porque el rotor no es magnético. Estos motores son particularmente adecuados para aplicaciones que requieren características de alto rendimiento.

Un circuito impreso o un motor de disco se compone de un disco de rotor de material no magnético y no conductor. El bobinado de la armadura y el conmutador se imprimen con cobre en ambos lados del disco. La armadura del disco se coloca entre dos conjuntos de imanes permanentes montados en

las placas ferromagnéticas. Las escobillas se colocan alrededor de la periferia interna. La figura 2.11 muestra el motor PCB

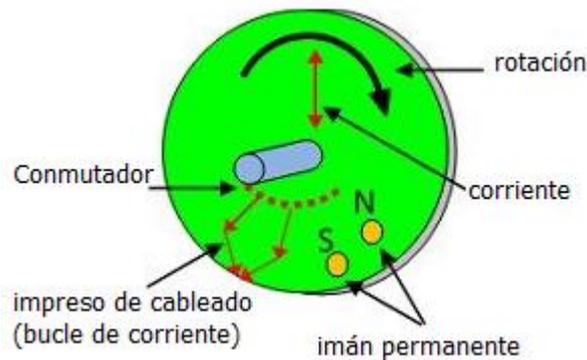


Figura 2. 11: Motor de circuito impreso.  
Fuente: (Circuit Globe, 2016)

La disposición del conjunto del motor proporciona un flujo axial a través del inducido. El par en el motor es producido por la interacción del flujo axial y de la corriente que fluye a través del disco de la armadura. Las diversas ventajas del motor de PCB son las siguientes:

- El motor proporciona aceleración y retraso rápidos. Como la inercia del motor es muy baja y, por lo tanto, la relación de par e inercia es muy alta.
- El rotor no contiene hierro, por lo que la inductancia del inducido es baja.
- La inductancia inferior del motor reduce las chispas y, como resultado, aumenta la vida de las escobillas.
- El par de amortiguación está ausente debido al rotor no magnético.
- Un motor PCB tiene una capacidad de corriente de sobrecarga alta.
- Hay una reacción de inducido insignificante y distorsión de flujo y por lo tanto la curva de par de velocidad del motor es lineal.

Existen diferentes aplicaciones del motor PCB, cuyas características dependen de la alta relación de par e inercia, hacen que el motor sea

adecuado para controlar aplicaciones. Los diferentes usos del motor son los siguientes:

- Se utiliza en lectores de cinta de alta velocidad.
- El motor de PCB se utiliza en registradores X-Y, y posicionador de herramienta punto a punto.
- Se utiliza en robots y otros servoaccionamientos.
- También es adecuado para unidades de servicio pesado, como cortadoras de césped.

### 2.3. Motor de corriente continua de excitación separada.

La figura 2.12 muestra un modelo de motor de corriente continua excitado por separado. Cuando un motor de excitación independiente es excitado por una corriente de campo,  $i_f$  y una corriente de inducido,  $i_a$  fluye en el circuito, el motor desarrolla una posterior fuerza electromotriz (FEM) y un par para equilibrar el par de carga a una velocidad particular.

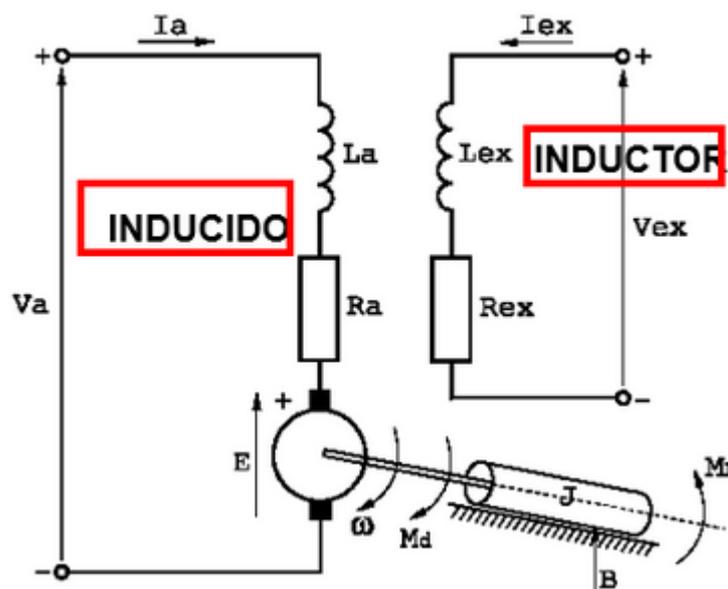


Figura 2. 12: Modelo de motor de corriente continua excitado por separado  
Fuente: (Benítez, 2015)

La corriente  $I_{ex}$  es independiente de la corriente  $I_a$ . Cada bobinado se suministra por separado. Cualquier cambio en la corriente del inducido no tiene efecto en la corriente de campo. El  $i_f$  es normalmente mucho menor que el  $i_a$ . La relación del campo y la armadura se muestran en la ecuación de la corriente de campo instantánea:

$$V_{ex} = R_{ex}I_{ex} + L_{ex} \frac{dI_{ex}}{dt}$$

Donde  $R_{ex}$  y  $L_{ex}$  son la resistencia de campo y el inductor respectivamente. Mientras, que la corriente de armadura instantánea es:

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + e$$

Donde  $R_a$  y  $L_a$  son la resistencia de inducido y el inductor respectivamente. La parte posterior del motor FEM también conocida como voltaje de velocidad:

$$e = K_v \cdot \omega \cdot I_{ex}$$

Donde  $K_v$  es la constante del motor (en  $V/A - rad/s$ ) y  $\omega$  es la velocidad del motor ( $rad/s$ ). Ahora, el par desarrollado por el motor es:

$$M_d = K_t \cdot I_{ex} \cdot I_a$$

Donde ( $K_t = K_v$ ) es la constante de par (en  $V/A - rad/s$ ). Para lo cual, el par desarrollado debe ser igual al par de carga:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_L$$

Donde,  $B =$  constante de fricción viscosa,  $N \cdot m/rad/s$ ,  $M_L =$  Par de carga, en  $N \cdot m$ , y  $J =$  Inercia del motor, en  $kg \cdot m^2$

Bajo operaciones en estado estacionario, una derivada temporal es cero. Suponiendo que el motor no está saturado. Por lo tanto, la corriente de campo queda así:

$$V_{ex} = R_{ex}I_{ex}$$

La parte posterior FEM es dada por:  $E = K_v \cdot \omega \cdot I_{ex}$

El circuito del inducido es:  $V_a = I_a R_a + E = I_a R_a + K_v \omega I_f$

Por tanto, la velocidad del motor puede derivarse fácilmente quedando:

$$\omega = \frac{V_a - I_a R_a}{K_{ex} I_{ex}}$$

Si  $R_a$  es un valor pequeño (que es usual) o cuando el motor está cargado ligeramente, es decir, es pequeño:

$$\omega = \frac{V_a}{K_{ex} I_{ex}}$$

Es decir, si la corriente de campo se mantiene constante, el motor de velocidad depende de la tensión de alimentación. Esta observación conduce a la aplicación de voltaje de corriente continua variable para controlar la velocidad y el par del motor de corriente continua.

#### **2.4. Control de velocidad de motores DC utilizando microcontroladores.**

Los sistemas de accionamiento eléctrico utilizados en aplicaciones industriales son cada vez más necesarios para cumplir con los requisitos de mayor rendimiento y fiabilidad. El motor de DC es utilizado como equipo en muchas aplicaciones industriales que requieren características de velocidad y carga variables debido a su facilidad de controlabilidad.

Para este tipo de control, los microcontroladores proporcionan un medio adecuado para satisfacer estas necesidades. Ciertamente, parte de la actividad reciente sobre los microcontroladores puede atribuirse a su novedad y desafío. Existen varios proyectos de investigación que utilizan los microcontroladores PIC como controlador para el control de velocidad. Los microprocesadores del microcontrolador calculan la velocidad real del motor mediante la detección del voltaje del terminal y la corriente, luego compara la velocidad real del motor con la velocidad de referencia y genera una señal de control adecuada que se alimenta a la unidad de disparo.

Otra manera simple de controlar la velocidad, se logra a través de un potenciómetro variable para un sistema controlado manualmente; donde el operador compara mentalmente la velocidad real con una velocidad deseada y en consecuencia ajusta el potenciómetro. Al comparar la velocidad en revolución por segundo (rps) actualizado en la pantalla CRT cada segundo a una velocidad deseada, corrige la velocidad actual girando el potenciómetro en el sentido de las agujas del reloj para aumentar o en sentido anti-horario para reducir, la velocidad.

## **2.5. Controladores convencionales.**

El motor de inducción puede ser controlado con la ayuda del controlador PI (Proporcional-Integral), PD (Proporcional-Derivativo) y PID (Proporcional-Integral-Derivativo) convencional, utilizando la técnica indirecta de control orientada al campo. El controlador convencional es un controlador de realimentación. Calcula un valor de error como la diferencia entre el valor de

proceso medido y el valor de consigna deseado y luego mueve la planta controlada para mantener el error de estado estable igual a cero. A continuación, se describen los controladores mediante información del trabajo de (Fattah, 2015)

### 2.5.1. Controlador Proporcional-Integral (PI).

El controlador Proporcional-Integral, PI, es el más adoptado en aplicaciones industriales debido a su estructura simple, fácil de diseñar y bajo costo. El controlador PI produce una señal de salida consistente en una suma de error y la integral de ese error. El error representa la diferencia entre la velocidad del motor deseada y la velocidad real del motor, y se expresa como:

$$E = \omega_{ref} - \omega_{act}$$

La figura 2.13 muestra el diagrama de bloques del controlador PI clásico.

La función de transferencia para el controlador PI se expresa como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

Donde,  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $K_i$  es la ganancia integral, y  $U(s)$  es la señal de control de salida que representa  $T_e^*$  la referencia de par en la unidad de control vectorial. Mientras que, la señal de control es proporcional a la señal de error, la integral del error, la ganancia proporcional  $K_p$  y la ganancia integral  $K_i$ . El controlador proporcional tendrá el efecto de reducir el tiempo de subida y el error de estado estacionario. Aunque, esto no eliminará el error. Consecuentemente, el controlador Integral tendrá el efecto de reducir el error cerca del valor cero. Pero, tendría un efecto negativo sobre la velocidad de la respuesta y la estabilidad general del sistema.

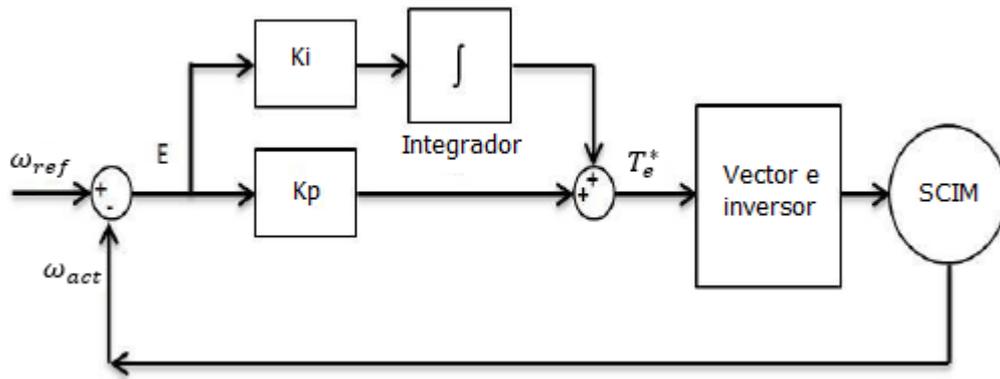


Figura 2. 13: Diagrama de bloques del controlador PI con control vectorial.  
Fuente: (Fattah, 2015)

### 2.5.2. Controlador Proporcional-Derivativo (PD).

El controlador Proporcional-Derivativo, PD, es un controlador que tiene la capacidad de predecir el error futuro del sistema. Por lo tanto, se utiliza para aumentar la estabilidad del sistema. La salida del controlador PD consiste en una suma de dos términos, la señal de error y la derivada de ese error. En consecuencia, la señal de error se calcula mediante la ecuación de la función de transferencia de la sección 2.5.1. En la figura 2.14 se muestra el diagrama de bloques del controlador PD, cuya función de transferencia del controlador PD se expresa como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s$$

Donde  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $K_d$  es la ganancia derivativa, y  $U(s)$  es la señal de control de salida que representa  $T_e^*$  la referencia de par en la unidad de control vectorial.

De la figura 2.14, la señal de control es proporcional a la señal de error, la derivada del error, la ganancia proporcional  $K_p$  y la ganancia derivativa  $K_d$ . El control derivativo se utiliza para anticipar el comportamiento futuro de la

señal de error mediante el uso de acciones correctivas basadas en la velocidad de cambio en la señal de error. Por lo tanto, tendrá el efecto de incrementar la estabilidad del sistema, reduciendo el rebasamiento y mejorando la respuesta transitoria.

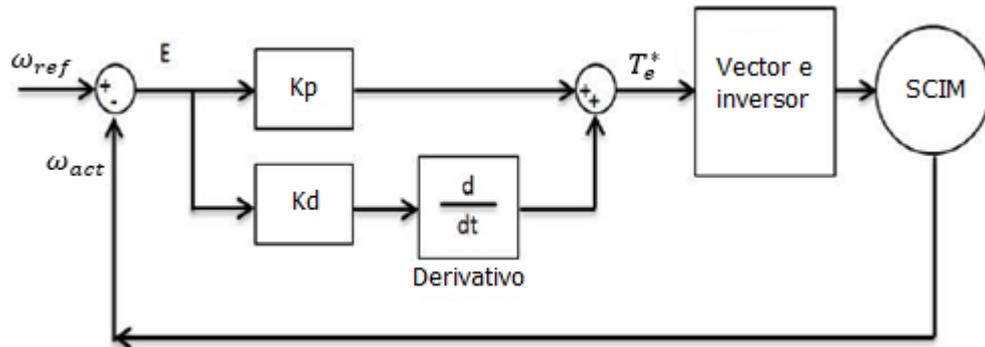


Figura 2. 14: Diagrama de bloques del controlador PD con control vectorial.  
Fuente: (Fattah, 2015)

### 2.5.3. Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

El controlador Proporcional-Integral-Derivativo, PID, es ampliamente utilizado en los sistemas de control industrial. El regulador PID tiene todas las dinámicas necesarias: reacción rápidamente al cambiar la entrada del controlador (controlador D), aumentando la señal de control al error de avance hacia cero (controlador I) y acciona adecuadamente dentro del área de error de control para eliminar oscilaciones (controlador P). El modo derivado mejora la estabilidad del sistema y permite aumentar la ganancia  $K_p$ , lo que aumenta la velocidad de la respuesta del controlador.

La salida del controlador PID consta de tres términos: la señal de error, la integral de error y la derivada de error. La señal de error se calcula mediante la ecuación tratada en la sección 2.5.1. La figura 2.15 muestra el diagrama de

bloques del controlador PID. La función de transferencia del controlador PID se expresa como:

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

Donde  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $K_d$  es la ganancia derivada,  $k_i$  es la ganancia integral, y  $U(s)$  es la señal de control de salida que representa la referencia de par  $T_e^*$  en la unidad de control vectorial.

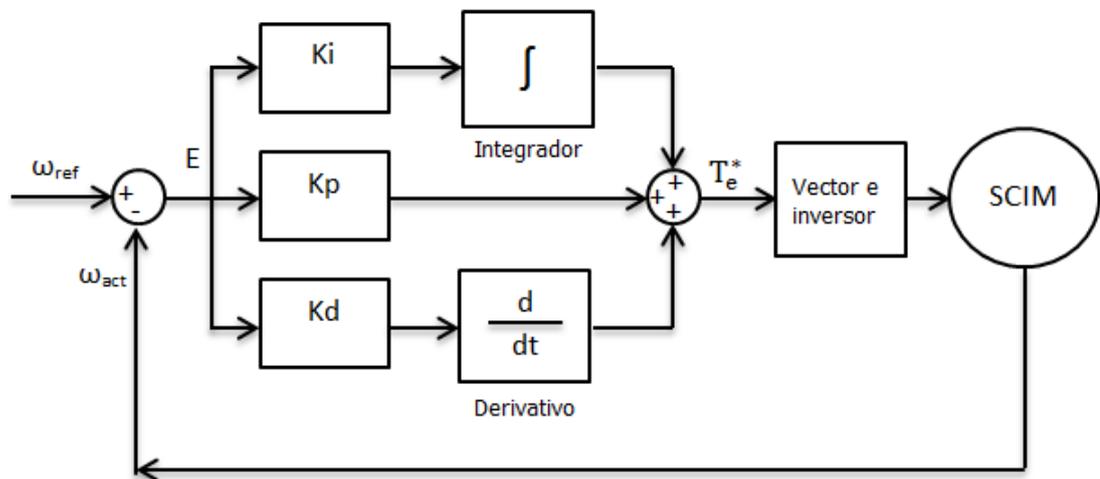


Figura 2. 15: Diagrama de bloques del controlador PID.  
Fuente: (Fattah, 2015)

El controlador PID combina la ventaja de la acción de control proporcional, derivativa e integral. La tabla 2.2 muestra el efecto del coeficiente de ganancia sobre el rendimiento del sistema.

Tabla 2. 2: Los efectos de los coeficientes de ganancia en el rendimiento del sistema de control PID.

Tipo	Tiempo de subida	Excederse	Tiempo de estabilización	Error de estado estacionario
$K_p$	Disminución	Incremento	Pequeño Cambio	Disminución
$K_i$	Disminución	Incremento	Incremento	Suprimido
$K_d$	Pequeño Cambio	Disminución	Disminución	Pequeño Cambio

Fuente: (Fattah, 2015)

## **2.6. Controlador de lógica difusa**

La lógica difusa, FL, es otra clase de inteligencia artificial. Su objetivo es plantar inteligencia humana en un sistema para que el sistema pueda pensar inteligentemente como un ser humano. Las técnicas de la lógica difusa se han reconocido en los últimos años como herramientas robustas para tratar el modelado de sistemas de controles complejos para los cuales no se pueden proporcionar descripciones matemáticas fáciles.

El control de la lógica difusa se considera como una estrategia de control lingüístico basada en el uso de la sentencia if-then para el proceso de control. En esta afirmación, varias variables que se expresan en lenguaje inglés natural, como positivo, cero y negativo, podrían utilizarse tanto en el antecedente (si-parte de la declaración) como en el consecuente (la parte de entonces de la declaración).

Como resultado, el modelo matemático del sistema no es necesario en el control fuzzy por lo que se puede aplicar a sistemas no lineales.

### **2.6.1. Función de pertenencia difusa.**

La función de pertenencia (*Membership Function, MF*) es una curva que define cómo los valores de una variable difusa en una determinada región se asignan a un valor de pertenencia  $\mu$  (grado de pertenencia) entre 0 y 1. La función de pertenencia puede tener formas diferentes, tales como triangular, trapezoidal, gaussiana, y campana generalizada, tal como se muestra en la

figura 2.16. La función de pertenencia más comúnmente utilizado es el tipo triangular, que puede ser de forma simétrica o asimétrica.

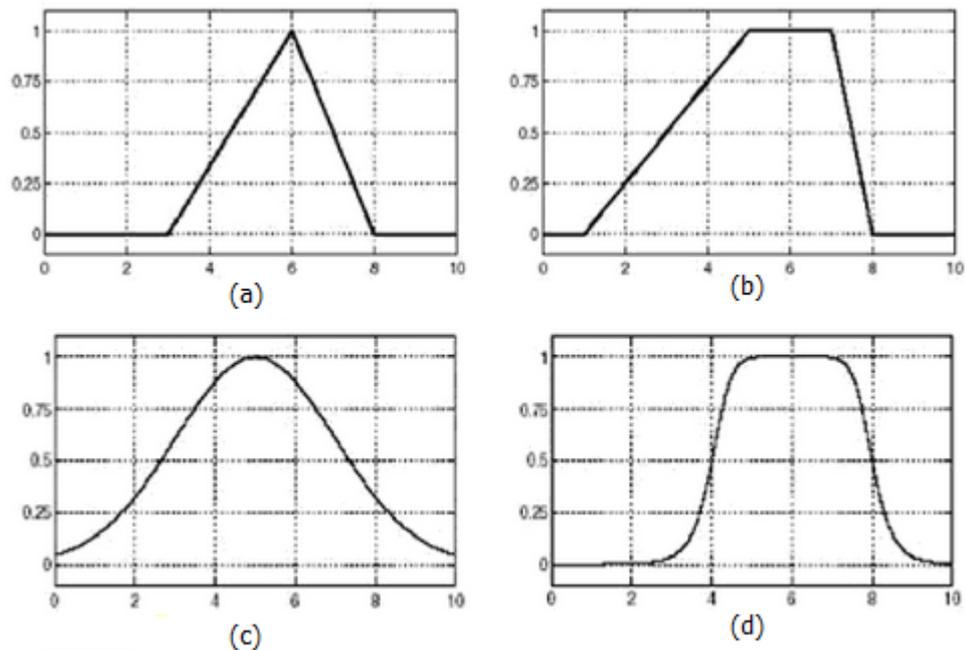


Figura 2. 16: Tipos de funciones de pertenencia difusa: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiano, y (d) campana generalizada.

Fuente: (Bose, 2010)

### 2.6.2. Estructura del sistema de lógica difusa.

La estructura básica del sistema de control de lógica difusa consta de cuatro partes principales, tal como se muestra en la figura 2.17, y que se pueden ilustrar de la siguiente manera:

#### 1. Base de conocimientos:

La base de conocimientos se compone de base de datos y base de reglas. La base de datos consta de funciones de pertenencia de entrada y salida que proporcionan información para operaciones apropiadas de fuzzificación y defuzzificación. La base de reglas contiene un conjunto de reglas lingüísticas que proporcionan información, por ejemplo, para motores de inferencia. Una regla difusa típica se da como:

If X is LENTO AND/OR Y is MEDIO then Z is RÁPIDO

Donde X e Y son las variables de entrada, Z es la variable de salida, LENTO, MEDIO y RÁPIDO son los conjuntos difusos, mientras que AND y OR son los operadores difusos.

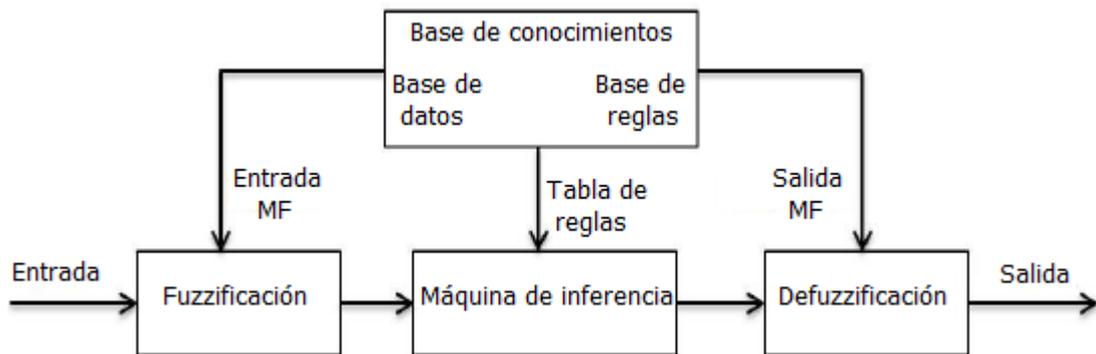


Figura 2. 17: Diagrama de bloques básico de controlador de lógica difusa.

Fuente: (Fattah, 2015)

## 2. Fuzzificación:

Es el proceso en el cual el valor de entrada nítido se convierte en un número difuso usando la función de pertenencia de entrada.

## 3. Máquina de inferencia.

El motor de inferencia difusa es el proceso que relaciona los conjuntos difusos de entrada para emitir conjuntos difusos usando reglas if-then y operadores difusos para impulsar un valor difuso de salida razonable. Hay una serie de sistemas de inferencia, tales como Mamdani, Lusing Larson y Sugeno.

## 4. Defuzzificación

Defuzzificación convierte el valor de salida fuzzificadas en un valor de control nítido utilizando la función de pertenencia de salida. Los métodos de defuzzificación más famosos son centro de área, Altura, Media de máximos, y Sugeno.

### 2.6.3. Principio de lógica difusa.

El diagrama de bloques del controlador difuso que se muestra en la figura 2.18. Hay dos señales de entrada para el controlador difuso, la señal de error  $E$  y la derivada de error que representa el cambio en la señal de error  $CE$ . La salida del controlador es la señal  $U$ . El controlador observa la señal de error de bucle y cambia correspondientemente la salida  $U$  de manera que la señal de salida real coincida con la señal de referencia o comandada.

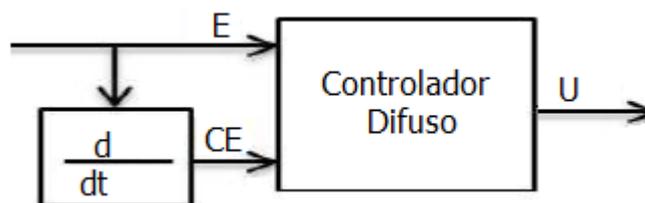


Figura 2. 18: Diagrama de bloques de un sistema de control difuso.  
Fuente: (Fattah, 2015)

## CAPÍTULO 3: Aportación del Trabajo de Titulación.

En el presente capítulo se diseñará el control difuso de temperatura para proteger motores de corriente directa (DC o CC), en el que se utilizará una tarjeta de adquisición de datos DAQ en conjunto con LabView.

### 3.1. Introducción a LabView 2013.

Para la realización del proyecto de control difuso se hará uso del software LabVIEW 2013 (véase la figura 3.1), el cual es una plataforma de desarrollo para diseñar sistemas, implementado por un lenguaje de programación gráfico. También, se utiliza el entrenador de plantas de control de National Instruments, conocido como EPC. Esta es una tarjeta electrónica en el cual incluyen sensores y actuadores que se encuentran en sistemas de instrumentación y control. El propósito principal del presente proyecto es el control difuso de temperatura para protección de motores DC.



Figura 3. 1: Software utilizado para el proyecto  
Elaborado por: Autor.

### 3.2. Herramienta para diseñar sistemas de control difuso.

Para el desarrollo del proyecto se debe considerar ciertas librerías instaladas en el programa LabVIEW, tal como la librería para hacer el control

difuso (véase la figura 3.2), y para la adquisición de datos se utiliza el DAQ Assistant (véase la figura 3.3).

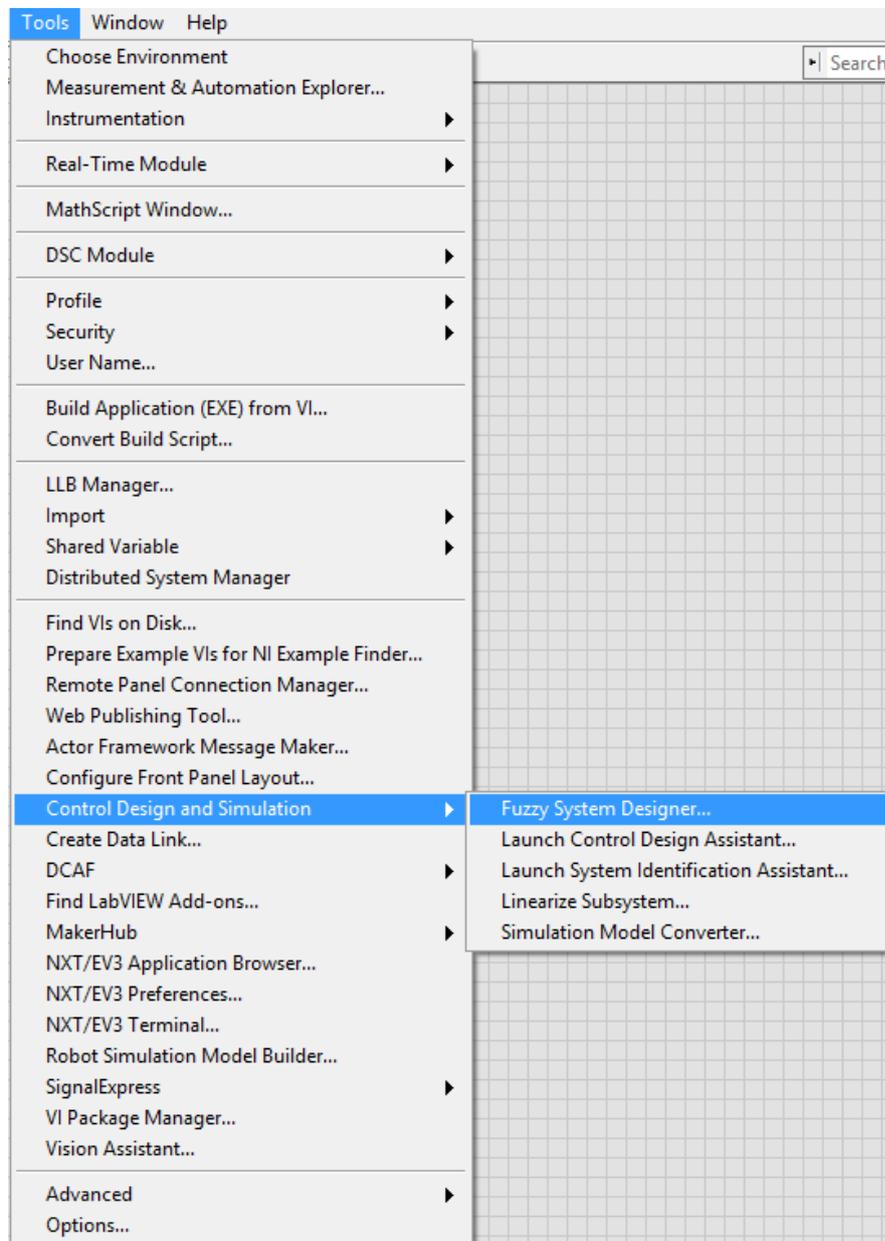


Figura 3. 2: Herramienta para el control Difuso.  
Elaborado por: Autor

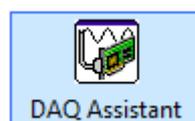


Figura 3. 3: Icono de la herramienta de adquisición de datos.  
Elaborado por: Autor

Una vez abierto el programa se escoge la opción general del programa que nos será suficiente para el tipo de aplicación del proyecto. Dar clic en el botón Start de LabVIEW (véase la figura 3.4) para la iniciación del programa.

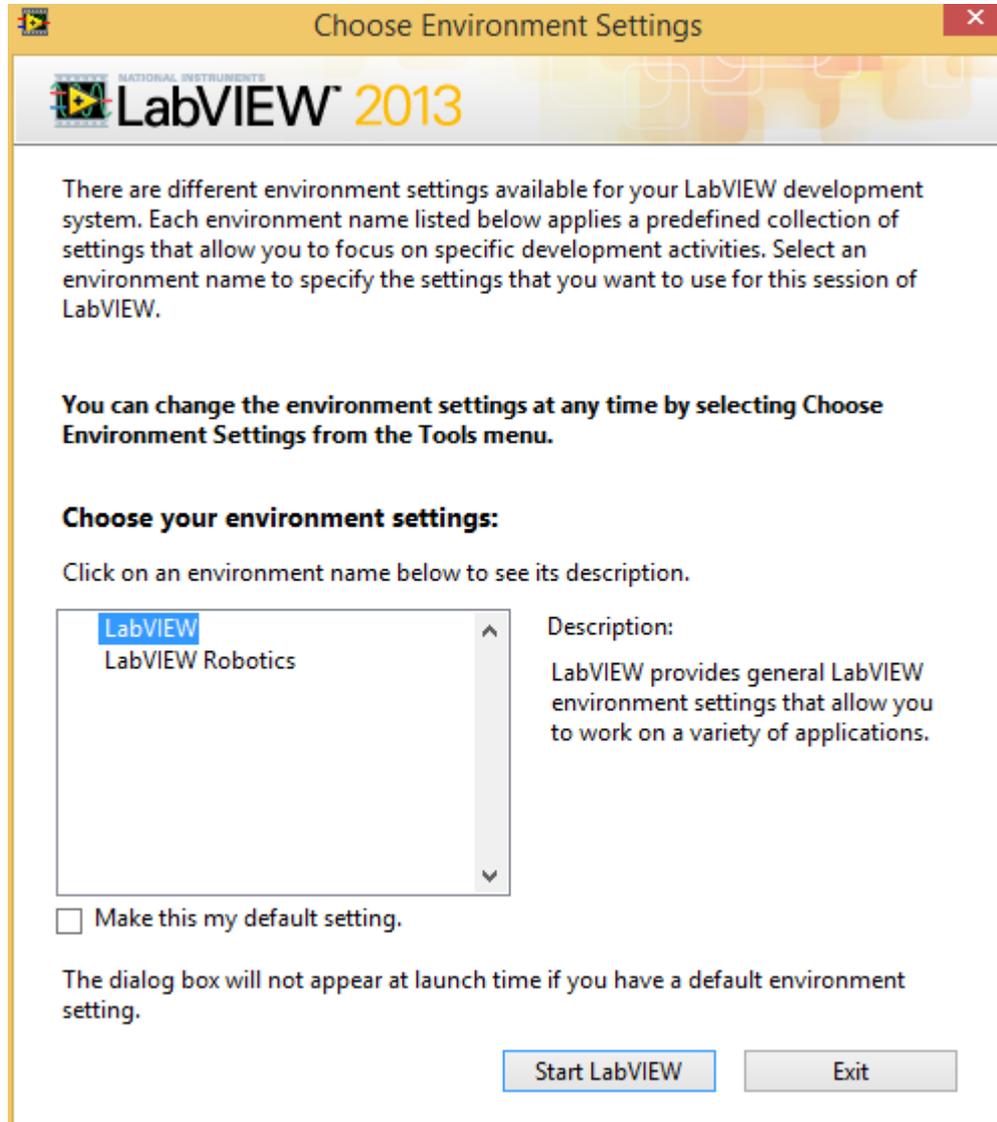


Figura 3. 4: Ventana de inicio del programa.  
Elaborado por: Autor

En la figura 3.5 se muestra la ventana para crear controles difusos, para lo cual es necesario escoger un nuevo proyecto, seleccionando el botón "Create Project".

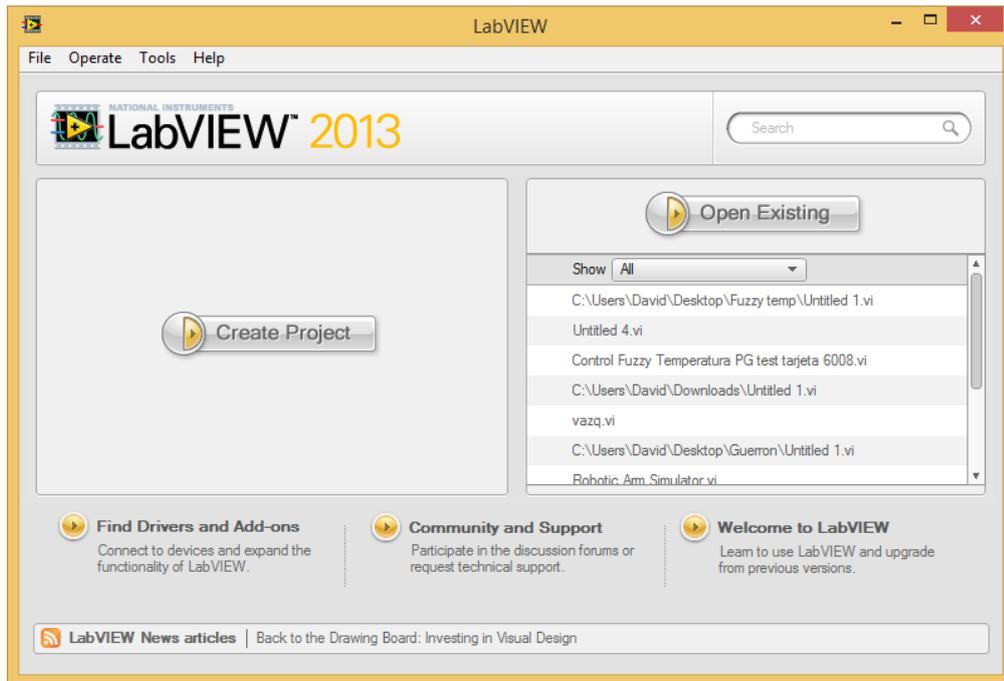


Figura 3. 5: Ventana para crear un nuevo proyecto.  
Elaborado por: Autor

La figura 3.6 muestra la ventana que permite elegir el tipo de proyecto a crear. En este caso se procede con la creación del instrumento virtual (VI), para lo cual se escoge la opción mencionada y presionamos el botón “Finish”.

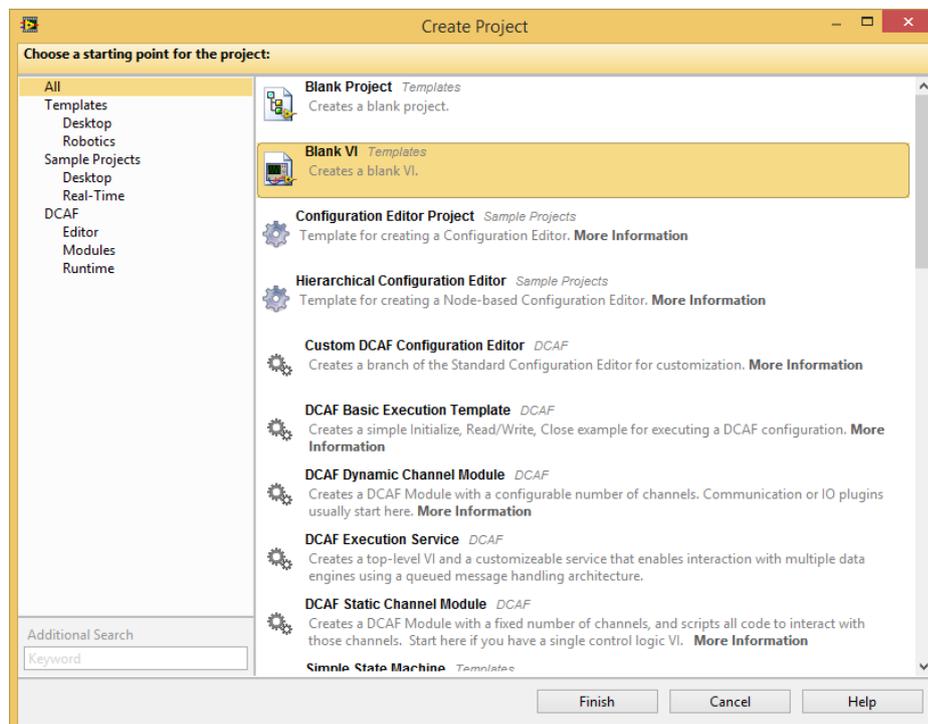


Figura 3. 6: Creación de un archivo VI.  
Elaborado por: Autor

Posteriormente, una vez creado el proyecto se tendrá dos ventanas (véase la figura 3.7) en las cuales se realizará la programación para el diseño del control difuso. La ventana de la izquierda es el <<Front Panel>>, en cual se podrá ver el proceso de manera gráfica y simultánea, siendo este el área de trabajo donde se refleja la programación. La ventana derecha es “Block Diagram” que constituye el código implementado ya sea para controlar o realizar cualquier proceso de entradas y salidas usadas en el programa.

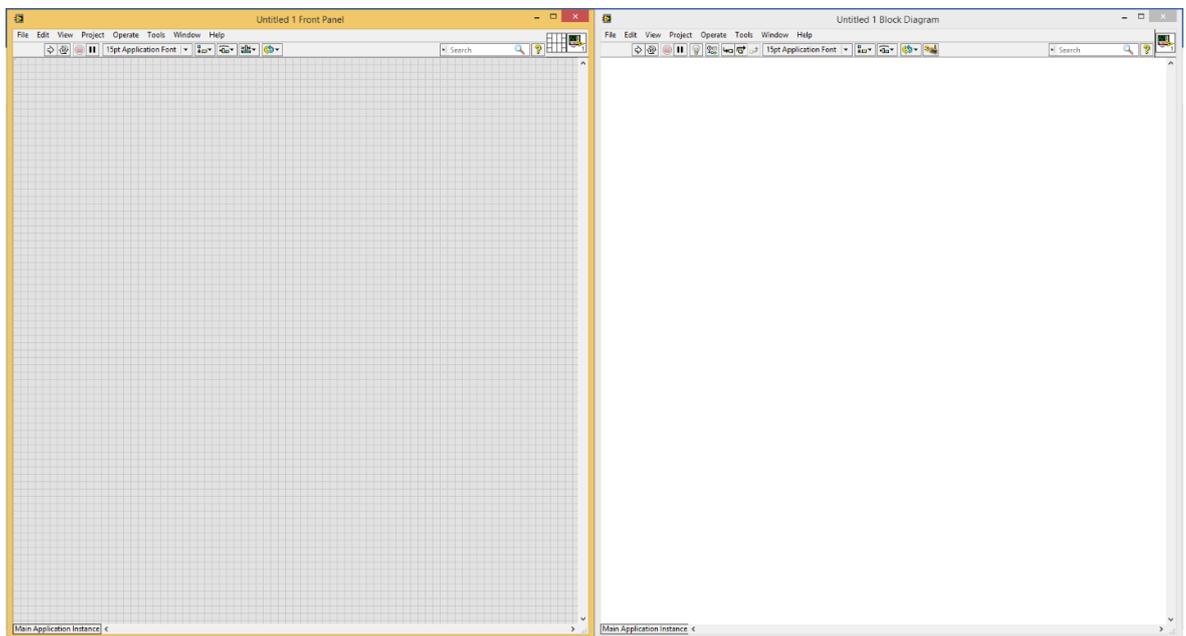


Figura 3. 7: Ventanas para la programación.  
Elaborado por: Autor

### 3.3. Diseño de funciones de entrada de pertenencia para control difuso.

La figura 3.2 mostró como seleccionar el control de diseño y simulación para el Sistema Difuso. La siguiente ventana (ver figura 3.8) permite definir las entradas y salidas del sistema a controlar y, a su vez crear las reglas que se usarán en el control difuso. La figura 3.9 muestra la creación de la entrada, la misma se llama Error.

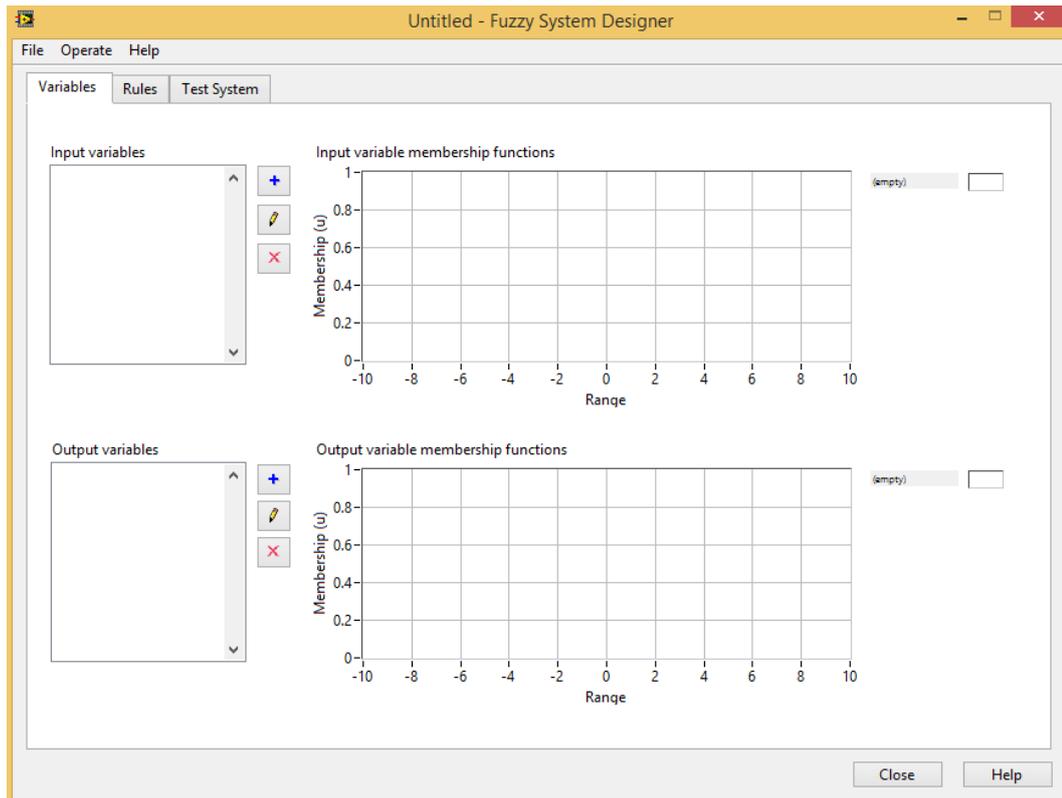


Figura 3. 8: Ventana de configuración del sistema.  
Elaborado por: Autor.

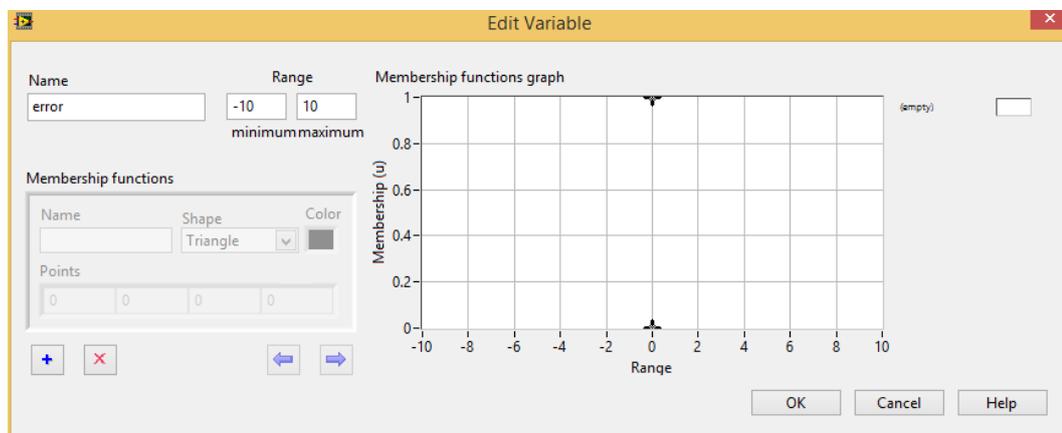


Figura 3. 9: Creación de la entrada de error.  
Elaborado por: Autor.

Ahora para la creación de las funciones de pertenencias (Membership) damos clic en el botón . La primera función membership se la llamará “Zero” de tipo triángulo, cuyo rango asignado es entre -50 y 50, y sus puntos serán todos ceros 0, tal como se muestra en la figura 3.10. Es decir, que todas las funciones membership serán de tipo triangular.

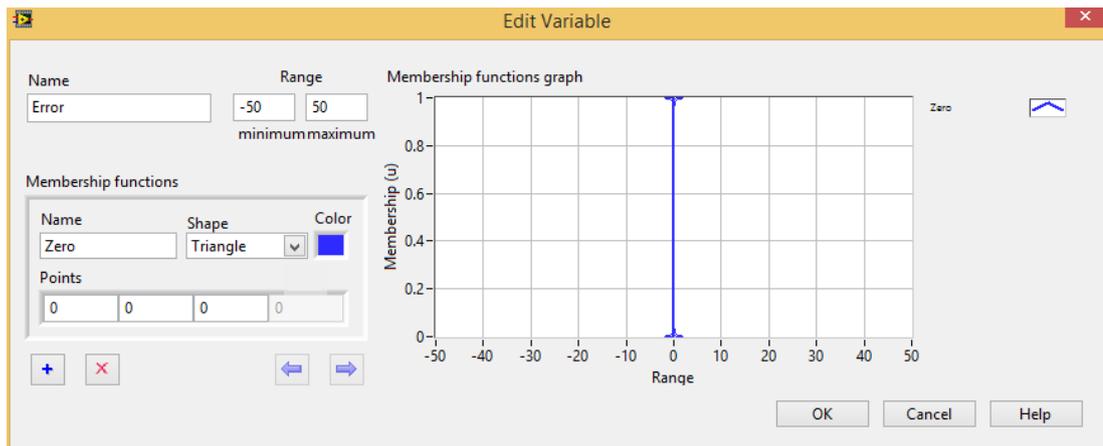


Figura 3. 10: Creación de la función de pertenencia Zero.  
Elaborado por: Autor.

Para la segunda función de pertenencia se designa el nombre “TMB” que significa Temperatura Media Baja, también de tipo triángulo y sus puntos son 0, 12.5 y 25, tal como se muestra la figura 3.11.

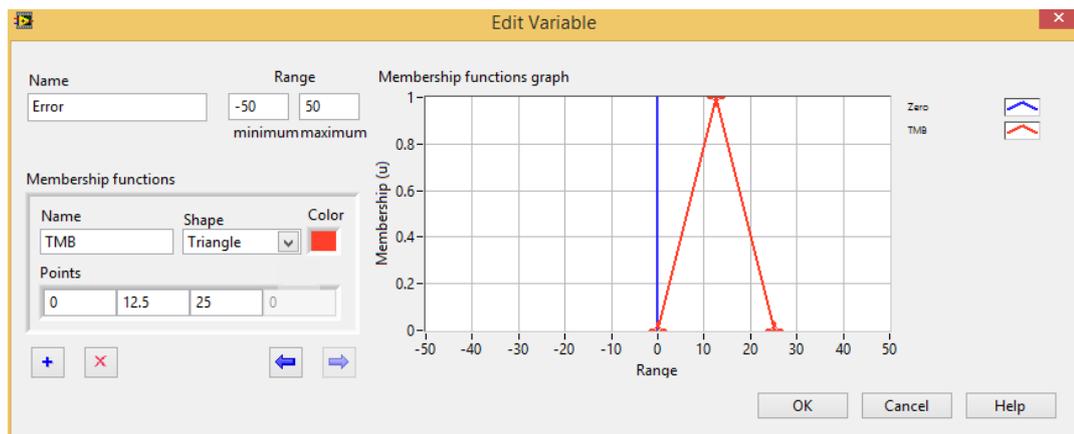


Figura 3. 11: Función de pertenencia TMB (color rojo).  
Elaborado por: Autor.

Mientras, que la tercera función de pertenencia se llama “TSB” que significa Temperatura Super Baja y sus puntos son 25 50 100 (véase la figura 3.12). La gráfica de la función de pertenencia solo se puede observar la mitad de ella ya que su último punto sobrepasa del límite máximo del rango.

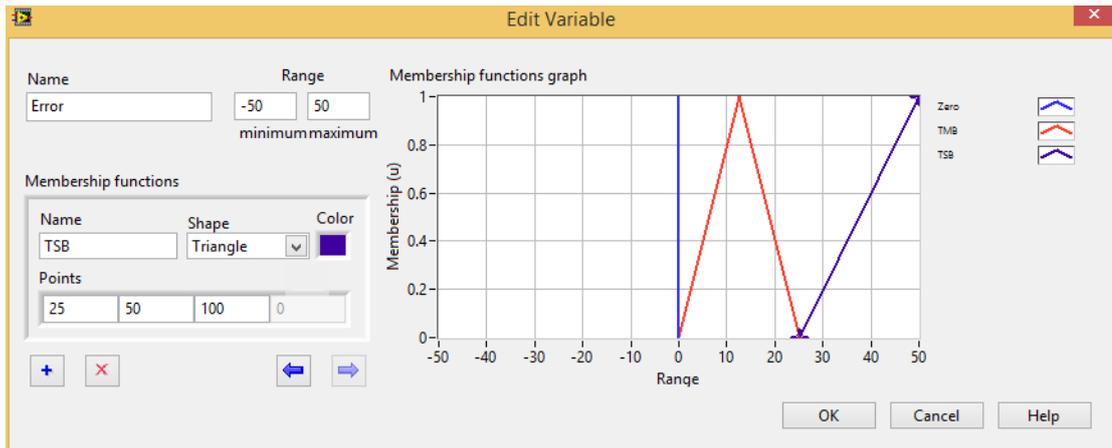


Figura 3. 12: Función de pertenencia TSB (color morado oscuro).  
Elaborado por: Autor.

La quinta función de pertenencia la denomina “TMA” lo que significa Temperatura Media Alta con sus puntos en -25 -12.5 0, tal como se muestra en la figura 3.13, cuyo rango se mantiene en -50 a 50.

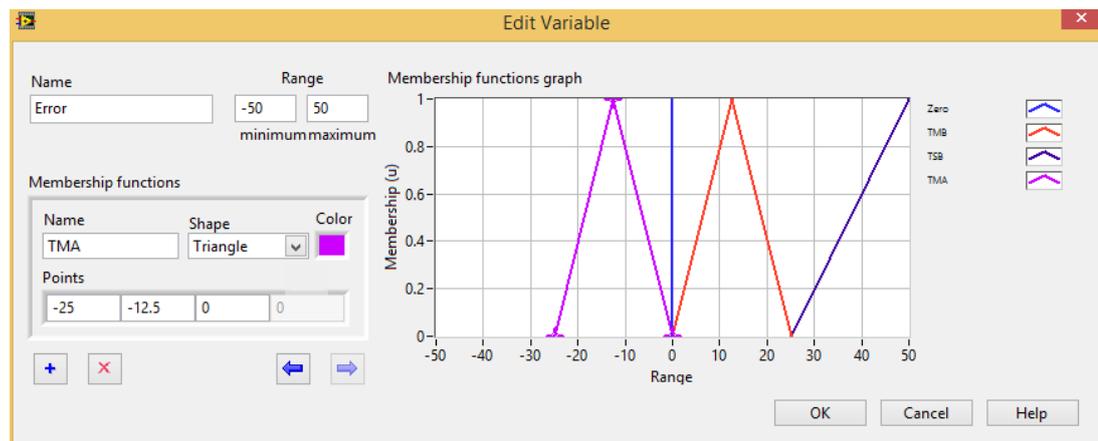


Figura 3. 13: Función de pertenencia TMA (color lila).  
Elaborado por: Autor.

Y la última función de pertenencia para la entrada se denominará “TSA” que significa Temperatura Super Alta, cuyos puntos son -100 -50 -25, tal como se muestra en la figura 3.14. Al igual de la función de TSB, esta también sobrepasa el límite mínimo del rango.

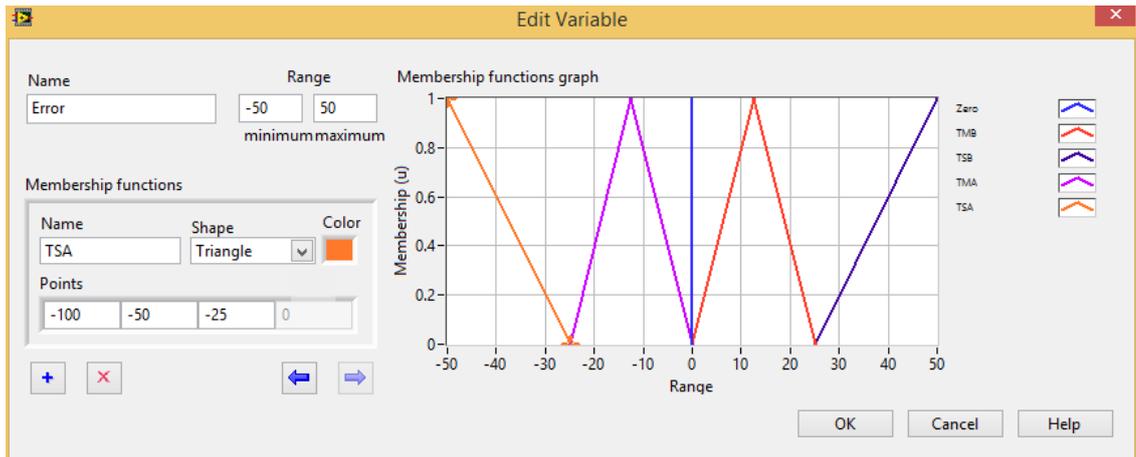


Figura 3. 14: Función de pertenencia TSA (color naranja).  
Elaborado por: Autor.

### 3.4. Diseño de funciones de salida de pertenencia para control difuso.

Ahora, se procede con la configuración de la salida denominada “Out” (ver figura 3.15), la misma que se le asigna un rango mínimo de 0 y un máximo de 100. Todas las funciones de pertenencia que se crearán para esta salida son de tipo triangular.

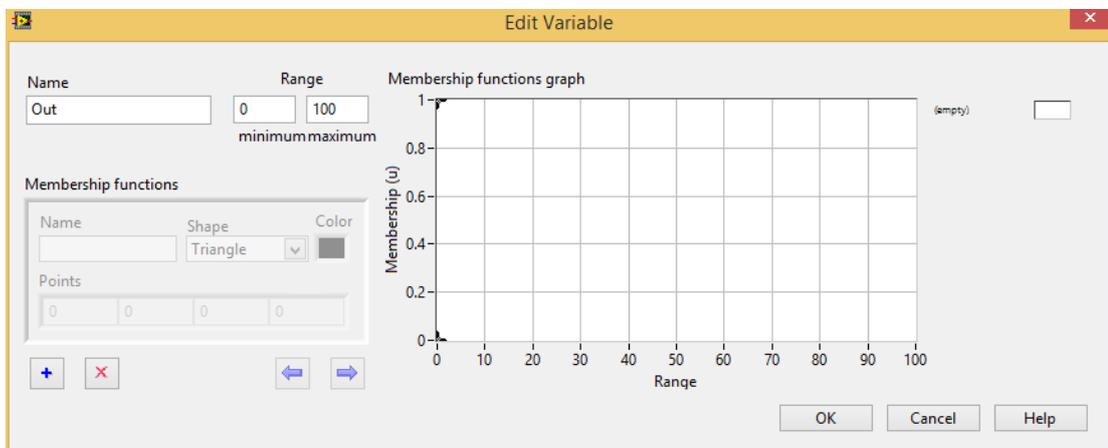


Figura 3. 15: Configuración de la salida Out.  
Elaborado por: Autor.

La primera función de pertenencia para la salida del sistema se llamará “CP”, lo que significa Caliente Poco y sus puntos serán 0 10 20, tal como se muestra en la figura 3.16. La figura 3.17 muestra la segunda función de pertenencia, en el cual todos los puntos son ceros 0 y se denomina “CN” que significa Caliente Nada.

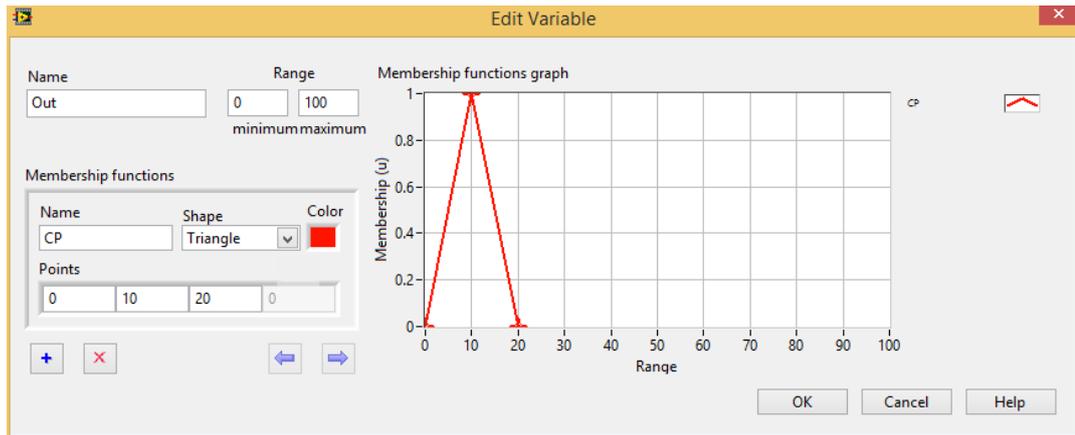


Figura 3. 16: Función de pertenencia CP (color rojo).  
Elaborado por: Autor.

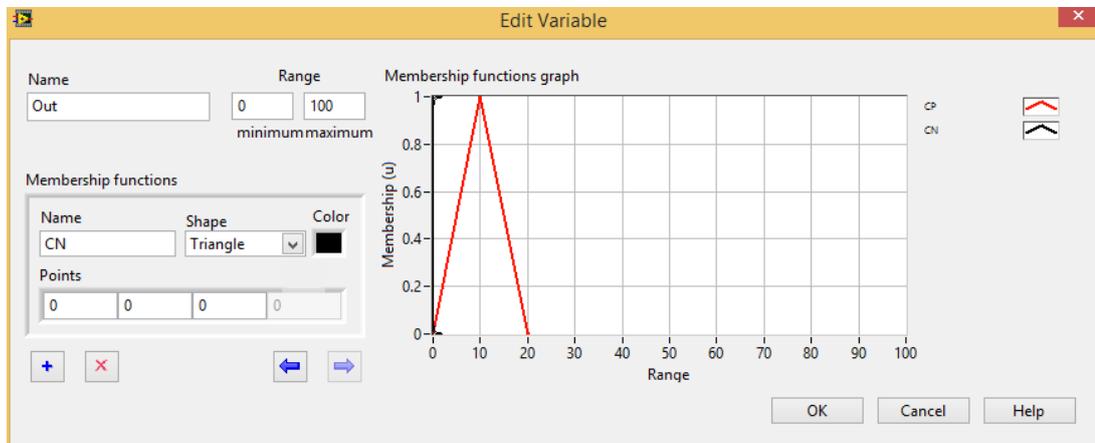


Figura 3. 17: Función de pertenencia CN (color negro).  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.18 muestra la siguiente función de pertenencia que es “CB”, el cual significa Calienta Bajo y cuyos puntos del triángulo son 20 30 y 40.

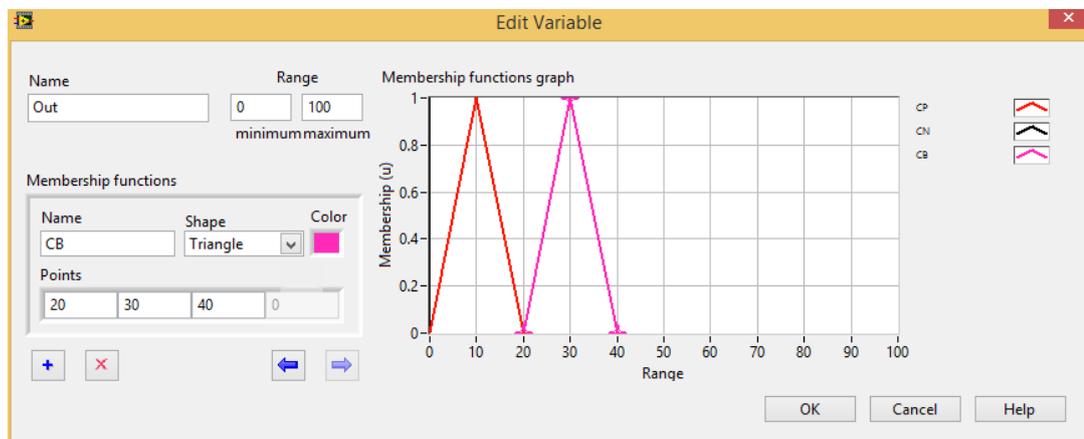


Figura 3. 18: Función de pertenencia CB (color rosado).  
Elaborado por: Autor.

La siguiente función de pertenencia a diseñar es Calienta Medio, la figura 3.19 muestra el nombre “CM” cuyos puntos son 40 50 60, está sirve para enviar el mensaje de Calienta Medio, siempre que se encuentre dentro de los puntos de CM.

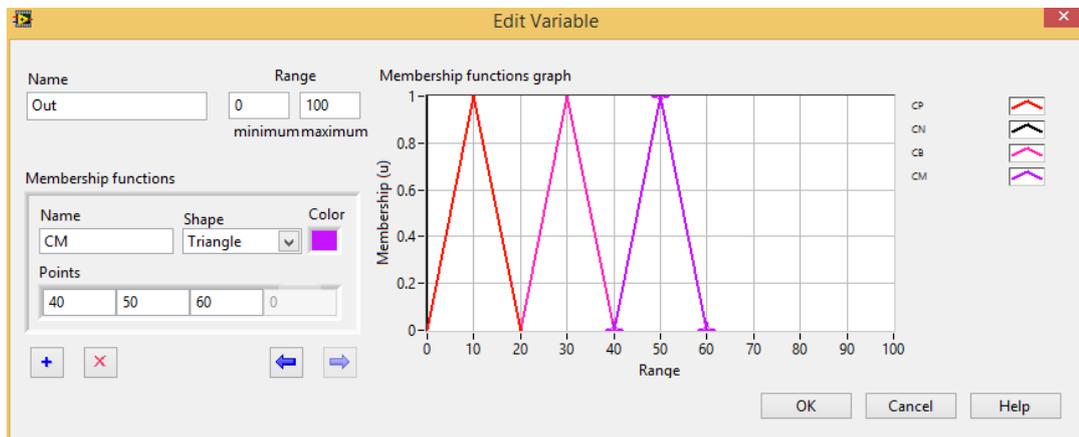


Figura 3. 19: Función de pertenencia CM (color lila).  
Elaborado por: Autor.

Para la última función de pertenencia los puntos serán 60 80 100 y se asigna el nombre de “CC” que significa Calienta Calienta, tal como se muestra en la figura 3.20.

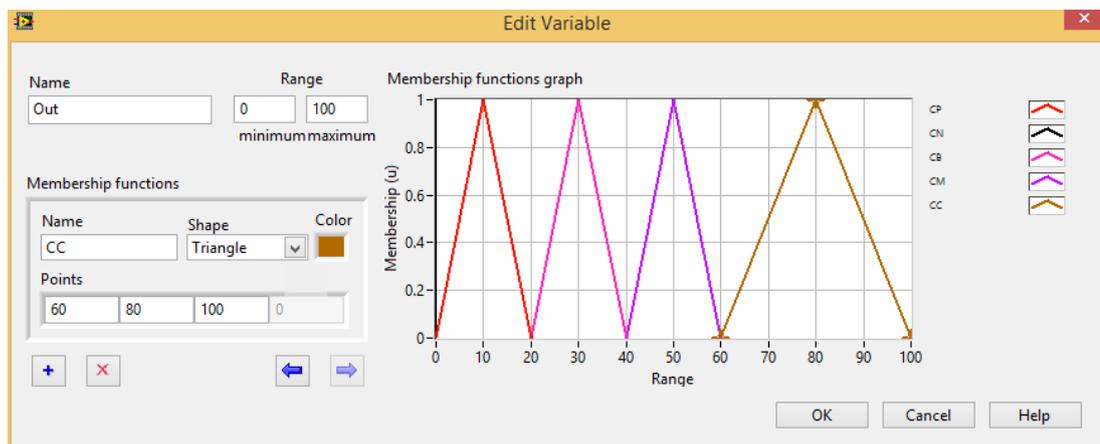


Figura 3. 20: Función de pertenencia CC (color marrón).  
Elaborado por: Autor.

Una vez ingresada todas las funciones de pertenencia para la entrada (Error) como para la salida (Out) se pueden observar las gráficas creadas (véase la figura 3.21).

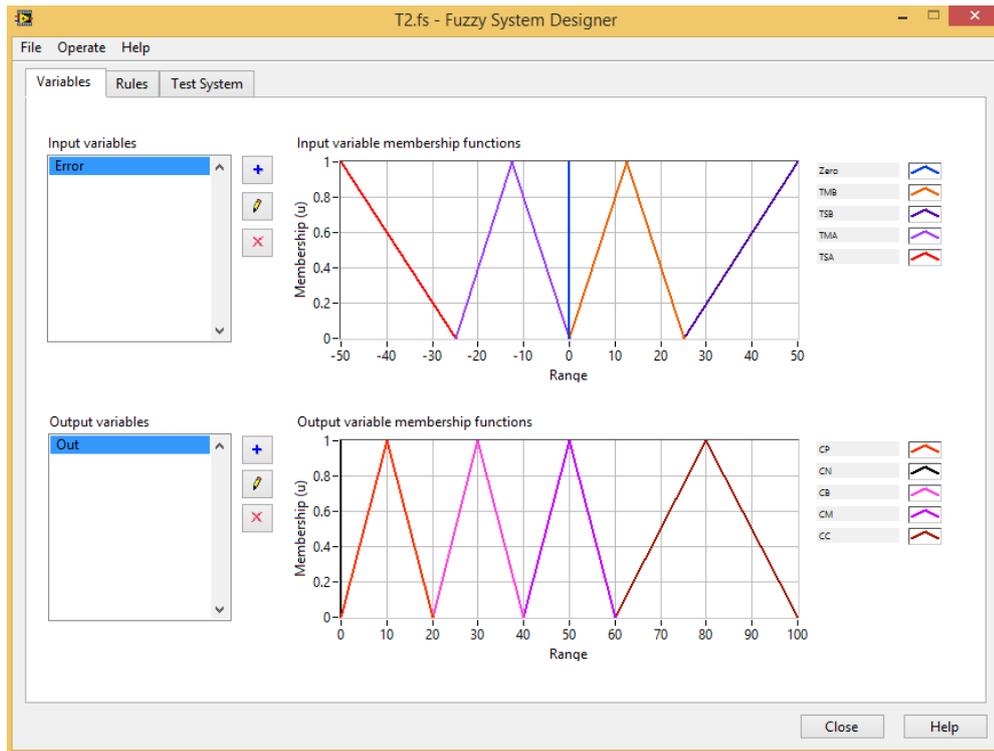


Figura 3. 21: Así luce la venta con las funciones de membresía.  
Elaborado por: Autor.

### 3.5. Diseño de reglas de la función de pertenencia para control difuso.

Esta sección permite construir las reglas del sistema difuso, y para crear

cada una de ellas damos clic en el botón  (véase la figura 3.22).

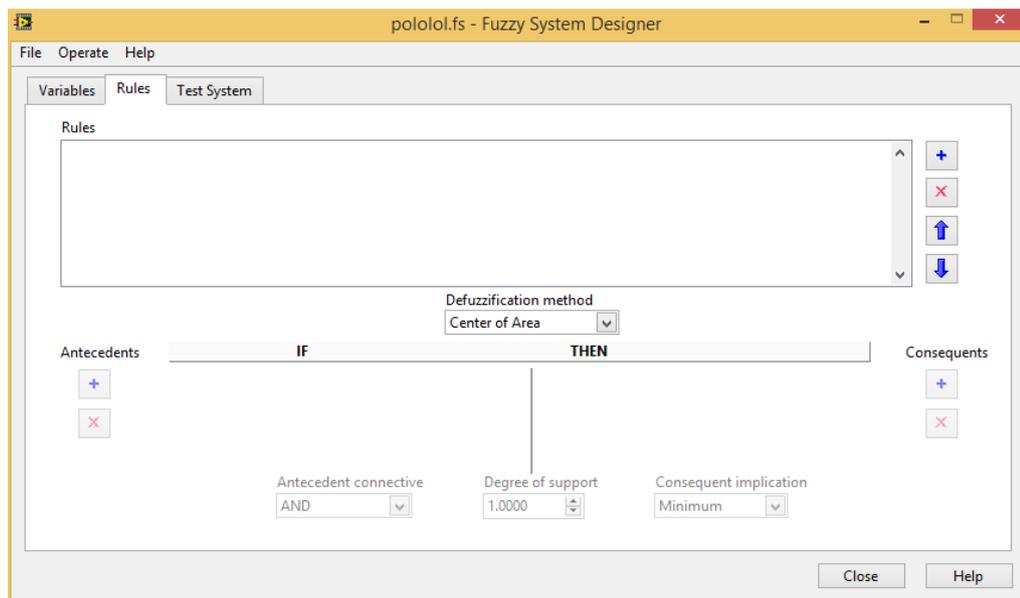


Figura 3. 22: Ventana de reglas.  
Elaborado por: Autor.

La primera regla se establece de la siguiente manera: si error es igual a TSB, entonces Out es igual a CN. Para establecer las reglas se deben cambiar los antecedentes de la misma con los campos desplegable dependiendo de lo que se necesite para el diseño del sistema difuso.

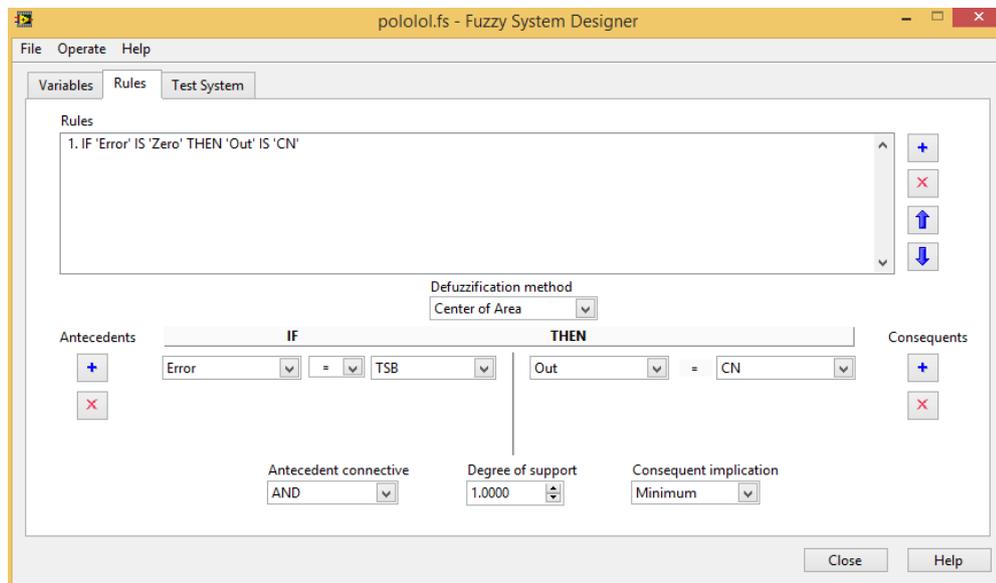


Figura 3. 23: Creación de la primera regla.  
Elaborado por: Autor.

Las demás reglas de configuración solo cambian las funciones de pertenencias (ver figura 2.24) y los antecedentes que vayan en ellas.

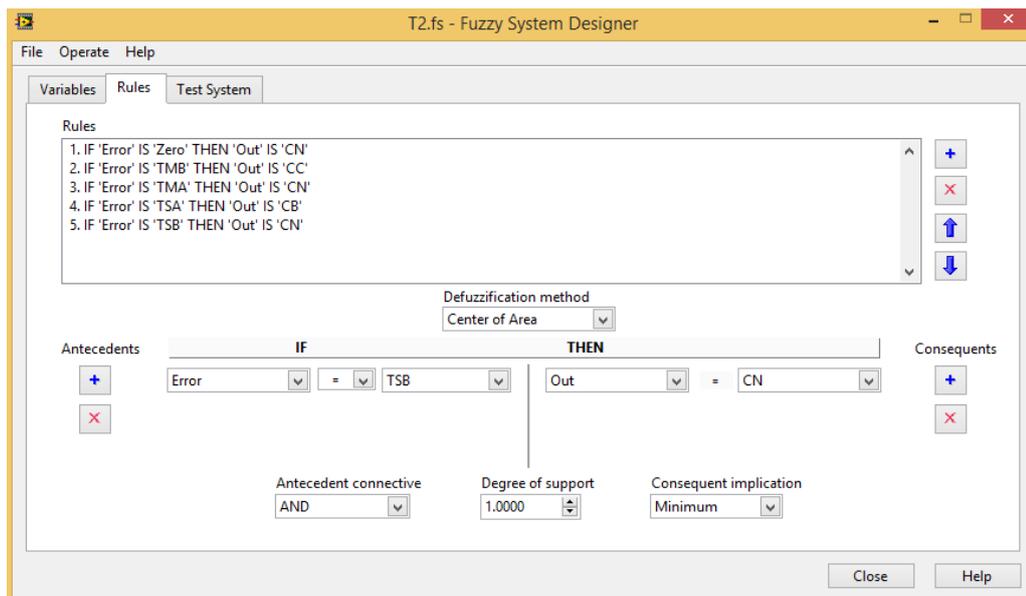


Figura 3. 24: Todas las reglas están establecidas.  
Elaborado por: Autor.

### 3.6. Configuración del sistema de prueba de la función de pertenencia para control difuso.

La figura 3.25 muestra la pestaña sistema de prueba (Test System), la misma permite observar la relación que existe tanto entre la entrada (Error) como la salida (Out). Aunque, también se pueden observar otras variables, escalas de las variables, etc.

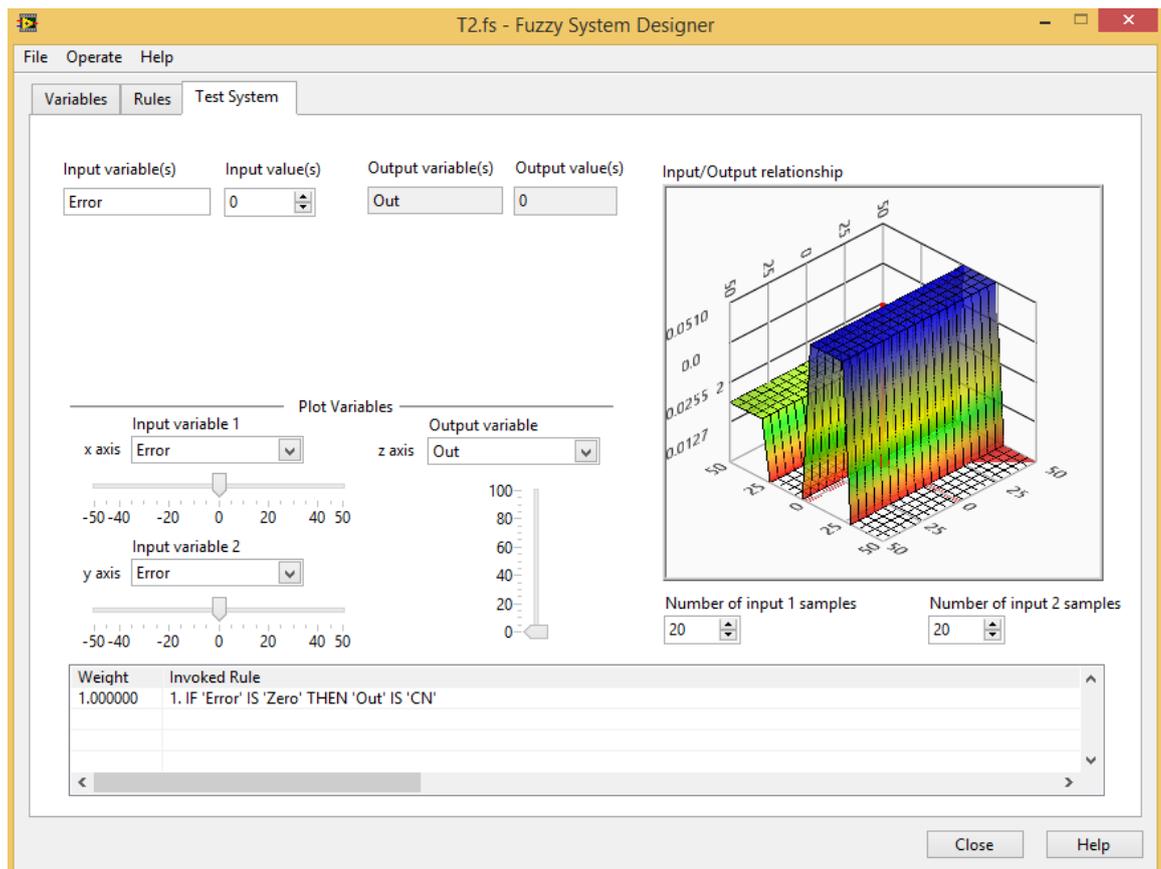


Figura 3. 25: Gráfica de la relación entrada/salida.

Elaborado por: Autor.

### 3.7. Programación del sistema de control difuso.

Para la programación se empieza por el Front Panel donde se buscan las herramientas necesarias y se las deslizan hasta el espacio de trabajo. En esta ventana se diseña la parte que se visualizará de manera dinámica cuando el programa este en ejecución. Se da clic derecho en cualquier parte del área

de trabajo y en la ventana se selecciona numérico (Numeric) señalada de color rojo, tal como se muestra en la figura 3.26.



Figura 3. 26: Ventana de herramientas del Front Panel.  
Elaborado por: Autor.

En la sección de Numérico de la paleta de herramientas se selecciona control numérico, en el cual se refleja un dato tipo numérico el mismo que se podrá modificar según los requerimientos del sistema a crear. (ver figura 3.27).

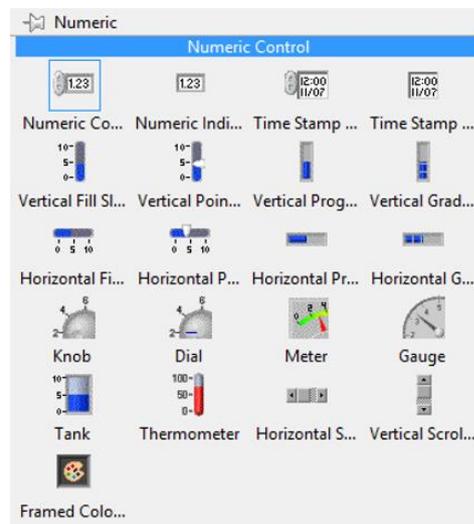


Figura 3. 27: Paleta de herramientas numéricas.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.28 se muestra el indicador numérico, que en este caso se escoge 3, los cuales se los encuentra en la misma ventana, justo al lado del controlador. Estos indicadores muestran un valor numérico el cual se visualizará en un cuadro.

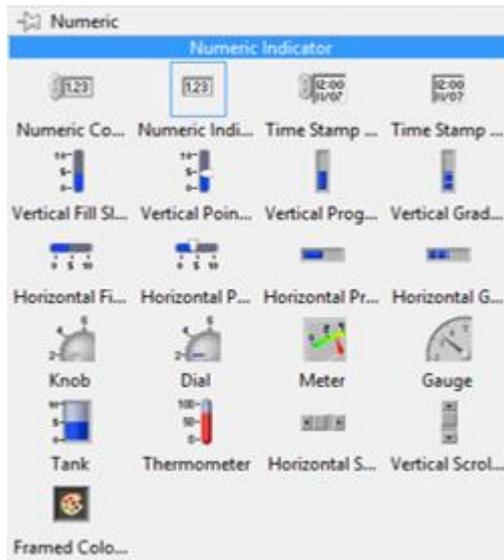


Figura 3. 28: Selección de Indicador numérico.  
Elaborado por: Autor.

Para los LED's se selecciona el botón Boolean marcado con rojo y se escoge Square LED, tal como se muestra en la figura 3.29. Para el proyecto, es necesario 4 indicadores para el: foco, ventilador, motor y STOP. Estos indicadores nos darán a conocer si una parte del proceso está activa o no.

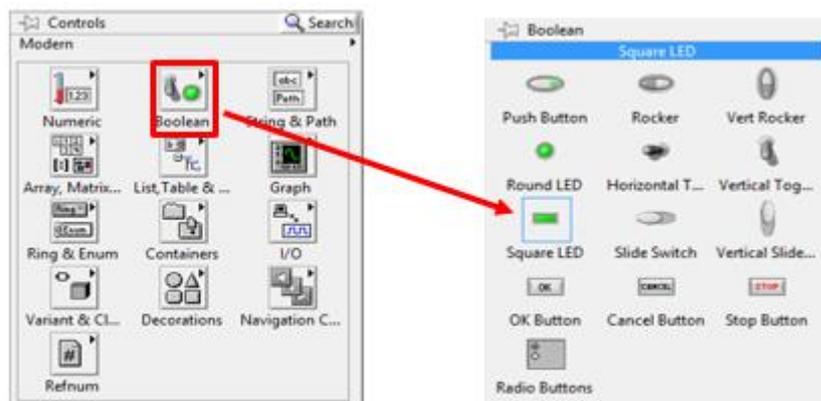


Figura 3. 29: Herramienta Boolean y Square LED.  
Elaborado por: Autor.

En esta misma sección de la paleta de herramientas se encontrará el botón Stop (ver figura 3.30). Con el cual detendremos el proceso en cualquier momento que se lo requiera.

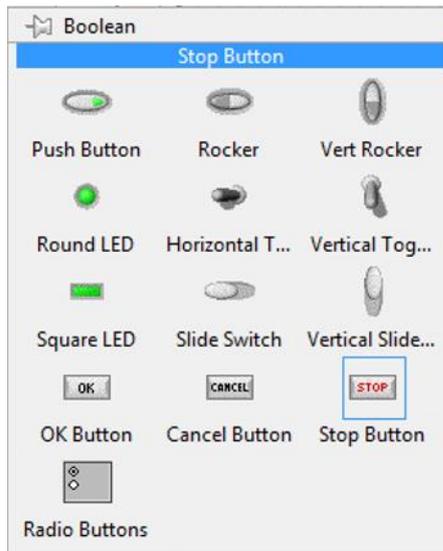


Figura 3. 30: Botón de Stop.  
Elaborado por: Autor.

Para poder observar el estado del proceso mediante gráficas será necesario seleccionar en la paleta de herramientas de control el instrumento gráfico Waveform Chart, tal como se muestra en la figura 3.31.

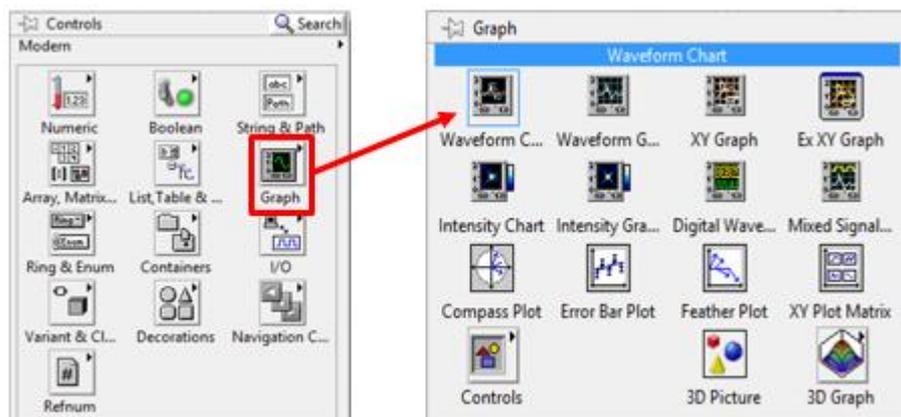


Figura 3. 31: Control de Gráficas y selección de waveform chart.  
Elaborado por: Autor.

Para modificar esta herramienta gráfica damos clic derecho y se selecciona propiedades (ver figura 3.32). En esta ventana la gráfica se puede modificar su apariencia gráfica, así como su amplitud, tipo de gráfica, escala, hacer visible la etiqueta, etc.

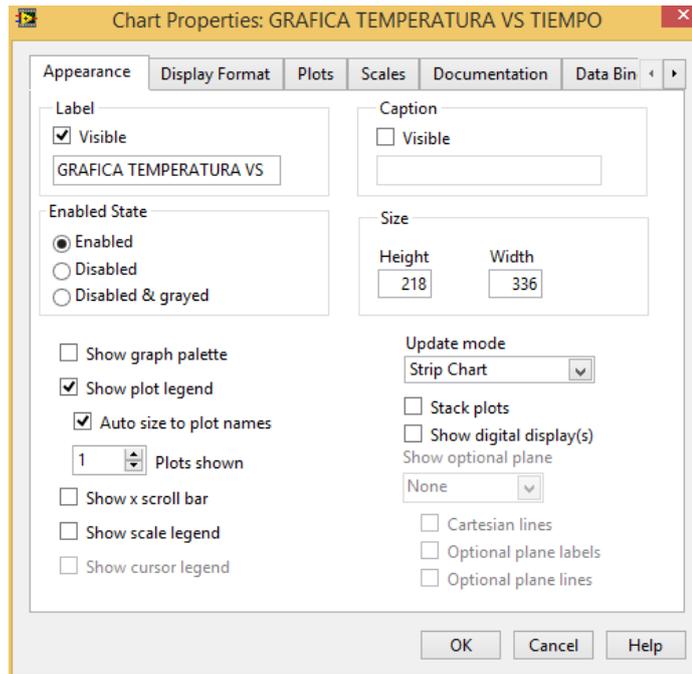


Figura 3. 32: Ventana de propiedades del Waveform.  
Elaborado por: Autor.

En la pestaña Display Format, se elige el tipo de gráfica Absolute Time tal como se muestra en la figura 3.33.

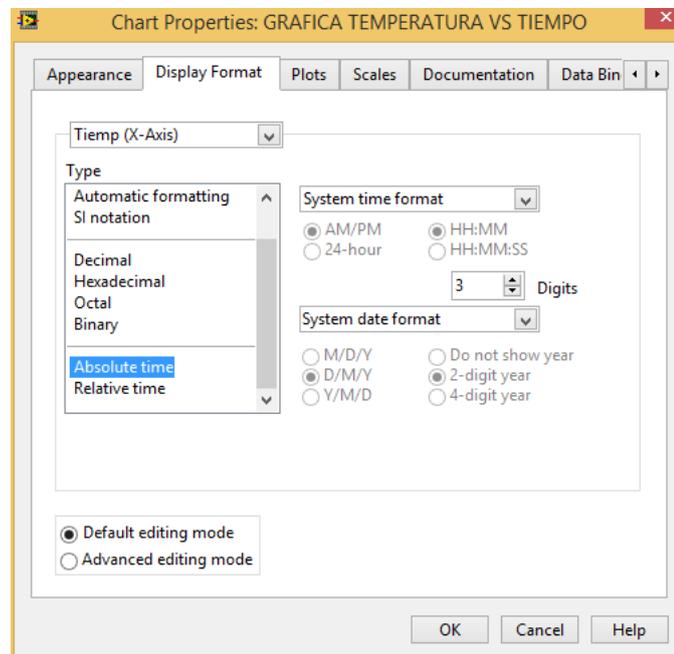


Figura 3. 33: Selección del formato de visualización.  
Elaborado por: Autor.

En la misma ventana se configura el tipo de gráfica en la pestaña Plots, donde se selecciona el Set Point y los ejes (ver figura 3.34).

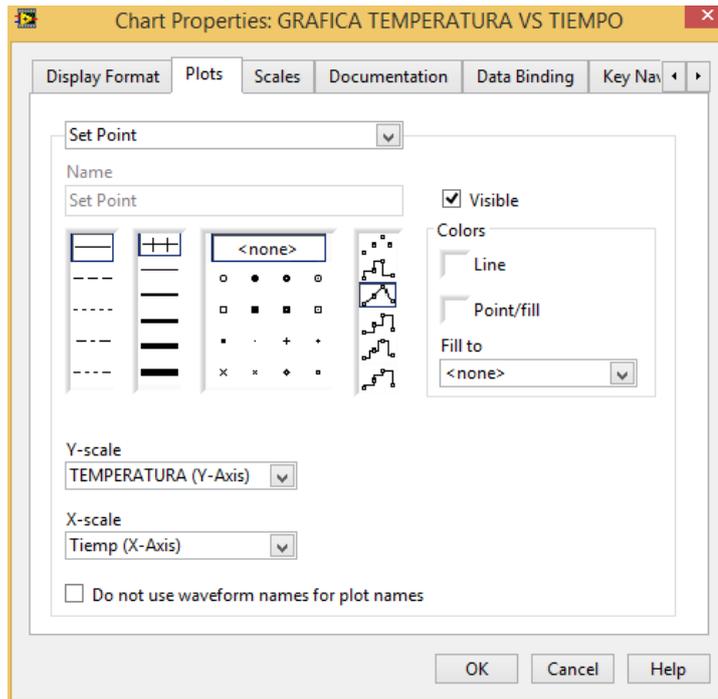


Figura 3. 34: Ventana de propiedades pestaña Plots.  
Elaborado por: Autor.

Para mostrar las escalas de la gráfica se selecciona la casilla Show scale que se encuentra en la pestaña Scale (ver figura 3.35). Una vez realizado los cambios mencionados se presiona Ok.

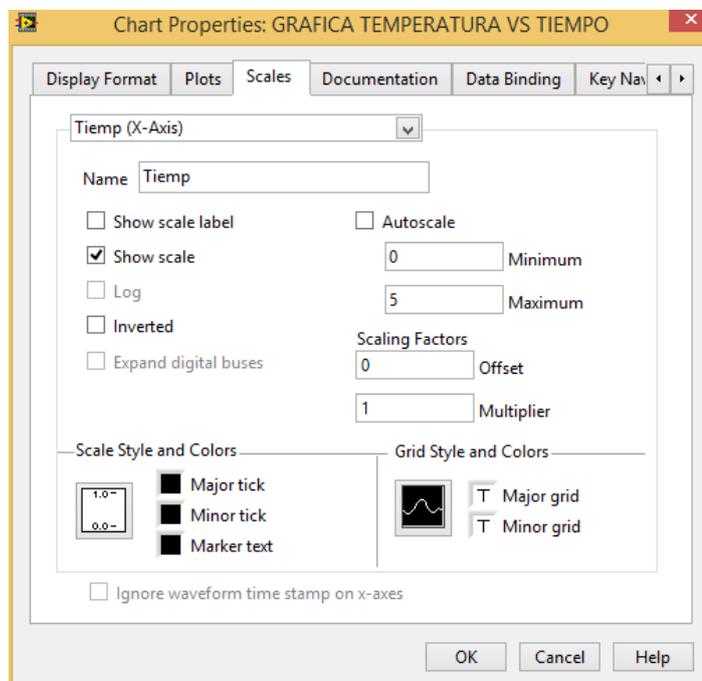


Figura 3. 35: Pestaña Scale.  
Elaborado por: Autor.

Con estas herramientas en el Front Panel se procede a trabajar con el Block Diagram. Para la programación del control se requiere de una estructura llamada While Loop. Dentro de la función Structures se encuentra While Loop, para lo cual se escoge 3 while loop. Para la configuración del control se requiere la herramienta Strip Path y Build Path (véase la figura 3.36) las cuales serán necesarias para el llamado del archivo.

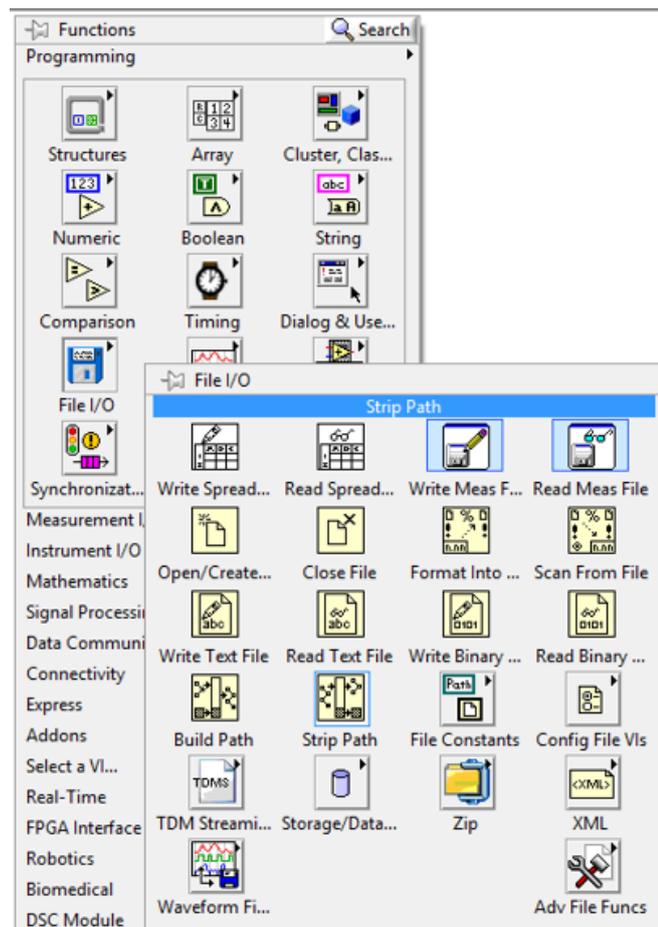


Figura 3. 36: Strip Path y Build Path.  
Elaborado por: Autor.

En Strip Path se ubica el puntero del mouse en la parte izquierda del icono y damos clic derecho y nos ubicamos en la opción File I/O Palette, seleccionando File Constants y dentro de esa venta se elige Current VI'S, tal como se muestra en la figura 3.37.

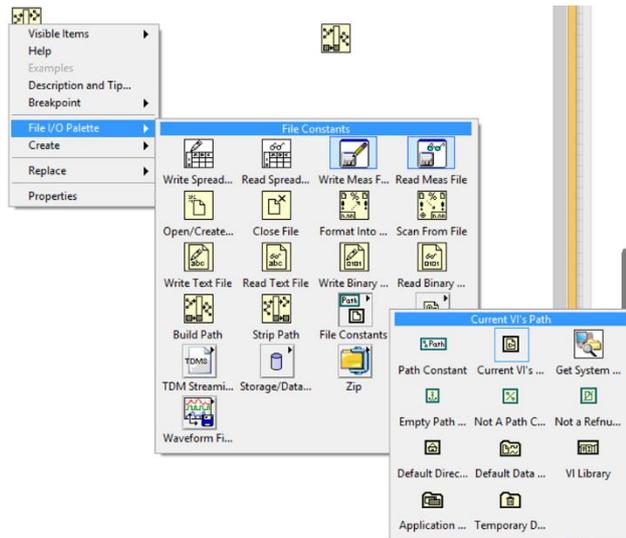


Figura 3. 37: Ubicación de la herramienta Current VI.  
Elaborado por: Autor.

Una vez que se agrega el Current VI se conecta al Strip Path y dicha conexión se muestra en la figura 3.38.

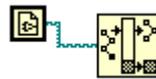


Figura 3. 38: Conexión del Current VI.  
Elaborado por: Autor.

Para el Build Path se debe crear una constante (ver figura 3.39), posteriormente, se asigna a esta constante el nombre con el que guardamos nuestro archivo de reglas y funciones de pertenencia, llamado T2.fs.

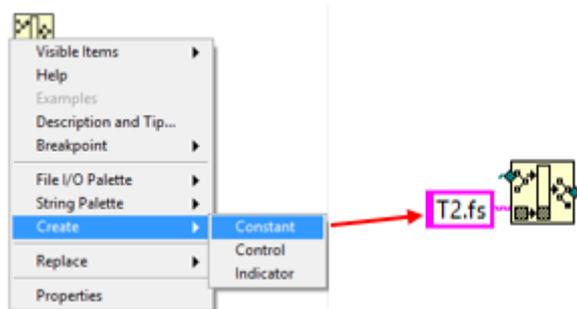


Figura 3. 39: Creación de la constante.  
Elaborado por: Autor.

Siguiendo con el control Difuso, se llama a la herramienta que ayudará a cargar el archivo previamente creado. Para ello hacemos clic derecho en el



Hay que tener en cuenta que se debe modificar la entrada del set point, el mismo que fue asignado un control numérico para lo cual es necesario agregar la operación resta (ver figura 3.42).

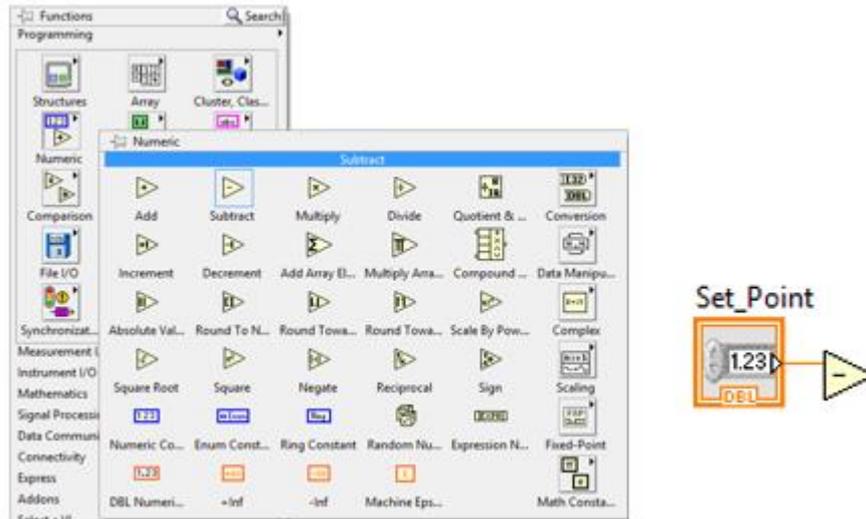


Figura 3. 42: Ubicación de la operación resta.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.44 muestra la conexión completa del controlador Fuzzy

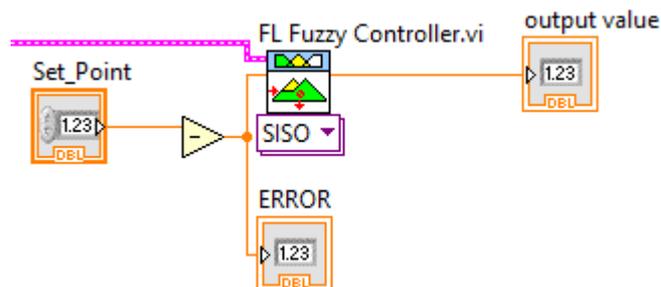


Figura 3. 43: Gráfica de la conexión.  
Elaborado por: Autor.

Posteriormente, se debe realizar la adquisición de datos utilizando la herramienta DAQ Assistant, la misma que debe estar cargada en el programa LabView, y está se encuentra en la sección Express, Input, DAQ Assistant (ver figura 3.44).

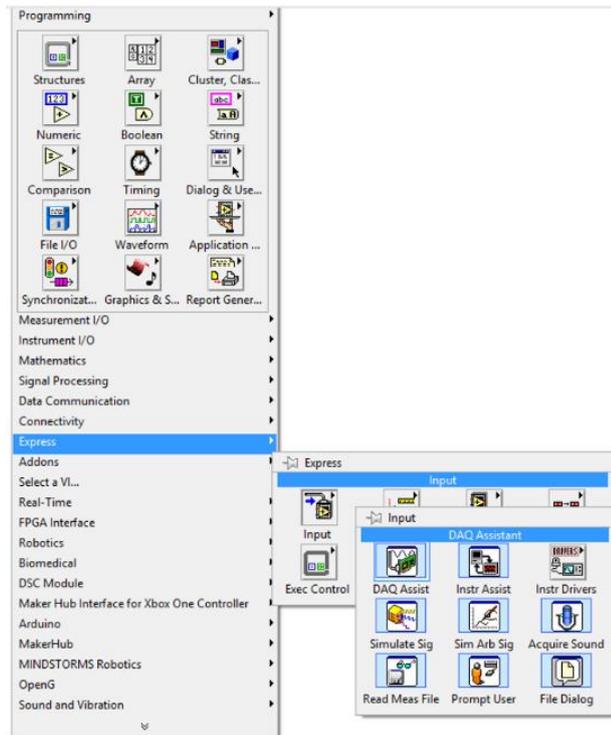


Figura 3. 44: Ubicación del DAQ Assistant.  
Elaborado por: Autor.

Al agregar esta herramienta al Block Diagram, automáticamente aparecerá una ventana de configuración, tal como se muestra en la figura 3.45, en la cual se eligen los tipos de datos para trabajar ya sea como entrada o salida, analógica o digital.

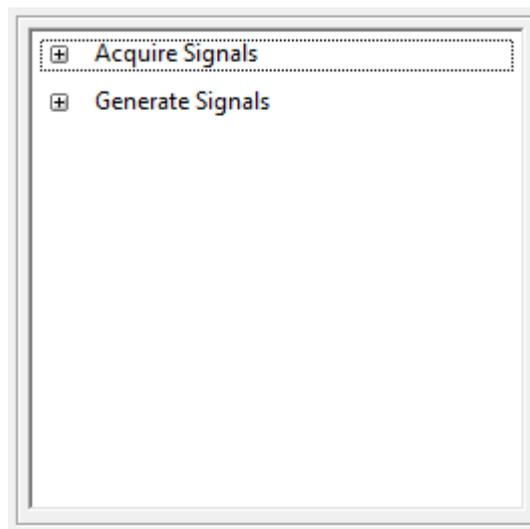


Figura 3. 45: Ventana de configuración del DAQ.  
Elaborado por: Autor.

Se procede a realizar la configuración de la primera DAQ, para lo cual se escoge Voltage desde Acquire Signals>>Analog input (véase la figura 3.46). Esta configuración sirve para adquirir señales de entradas analógicas.

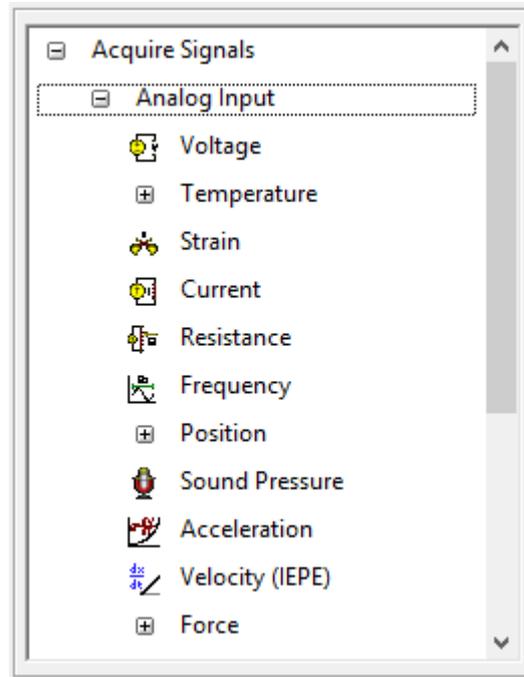


Figura 3. 46: Configuración del DAQ.  
Elaborado por: Autor.

Después, se asigna el canal físico que ocupará esta señal, en este caso se configura en el canal ao1, tal como se muestra en la figura 3.47.

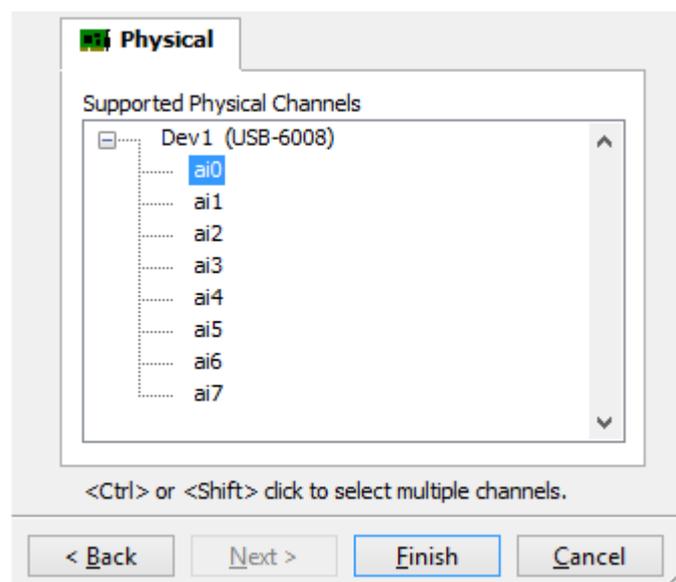


Figura 3. 47: Asignación del canal.  
Elaborado por: Autor.

Una vez finalizado el procedimiento anterior automáticamente se creará la ventana de propiedades del DAQ, tal como se observa en la figura 3.48.

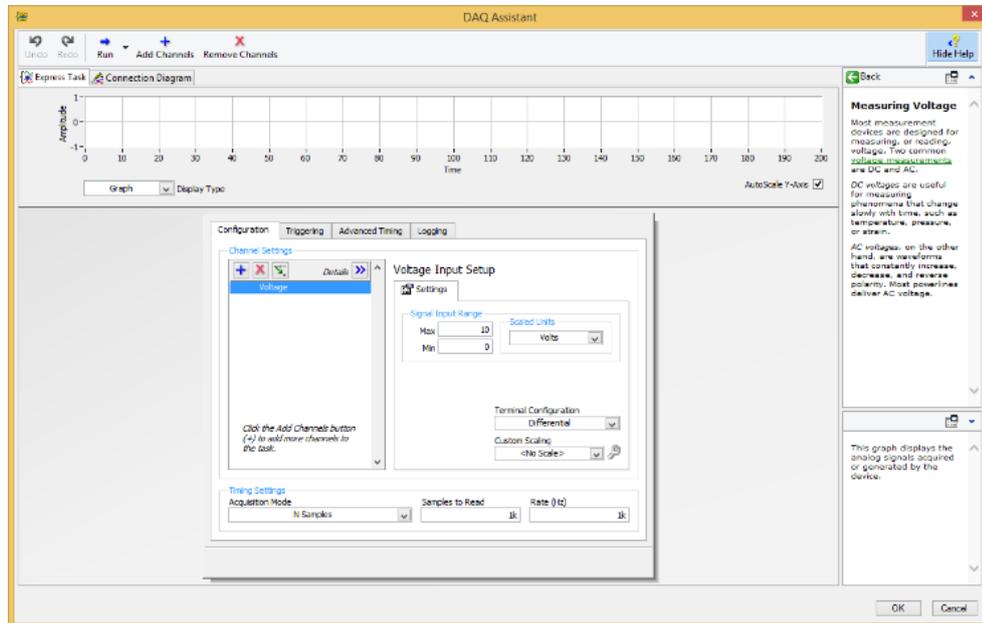


Figura 3. 48: Ventana de propiedades.  
Elaborado por: Autor.

Para finalizar el proceso de la configuración del DAQ damos clic en el botón OK y se genera la opción data (ver figura 3.49). Después es necesaria la implementación de un multiplicador para el cual se crea una constante y se asigna el valor de 100, tal como se muestra en la figura 3.50.

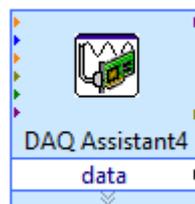


Figura 3. 49: Icono del DAQ.  
Elaborado por: Autor.



Figura 3. 50: Icono del multiplicador.  
Elaborado por: Autor.

Para enlazar la gráfica anterior con el controlador se requiere de la herramienta llamada Signal Manipulation (ver figura 3.51), la misma se encuentra ubicada en la sección Express, Signal Manipulation, Merge Signal.

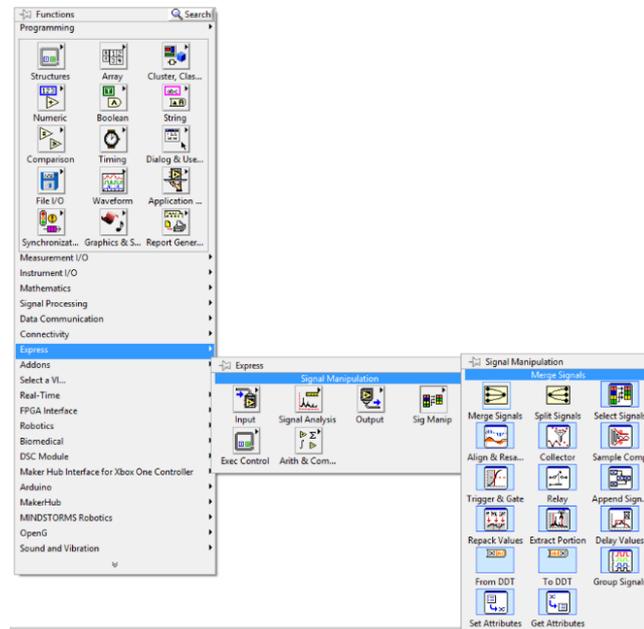


Figura 3. 51: Ubicación del signal manipulation.  
Elaborado por: Autor.

Cuando se tenga estos iconos dentro de la estructura While Loop se procede a conectarlos de la siguiente manera (ver figura 3.52).

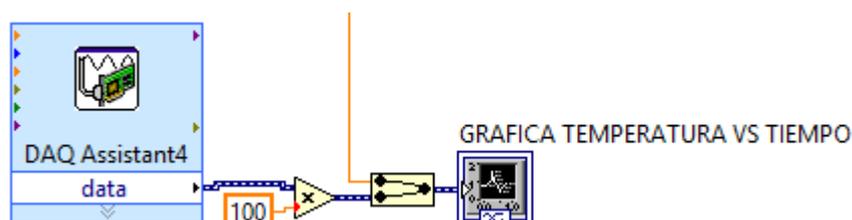


Figura 3. 52: Conexión de las herramientas del DAQ.  
Elaborado por: Autor.

Lo último que se hará en esta estructura será crear dos variables locales (véase la figura 3.53), que son: motor y ventilador. Y el procedimiento es el siguiente: al inicio se tendrá algo así , para asignarle una variable se da clic sobre el icono y se selecciona Motor (ver figura 3.54). Una vez que se asigna la variable el icono cambiará y tendrá esta apariencia.

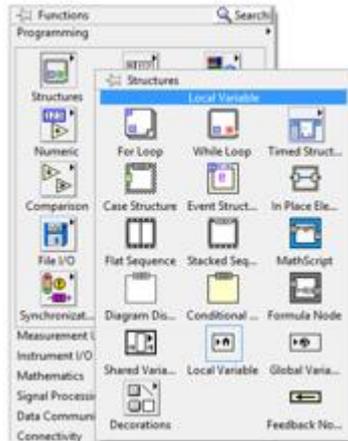


Figura 3. 53: Ubicación de la variable local.  
Elaborado por: Autor.

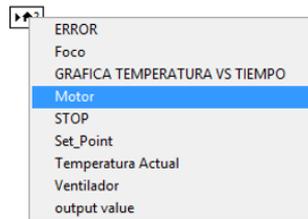


Figura 3. 54: Asignación de la variable.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.55 muestra el diagrama de bloques con estructura While para graficar la temperatura versus tiempo, utilizando la tarjeta de adquisición de datos Daq 6009.

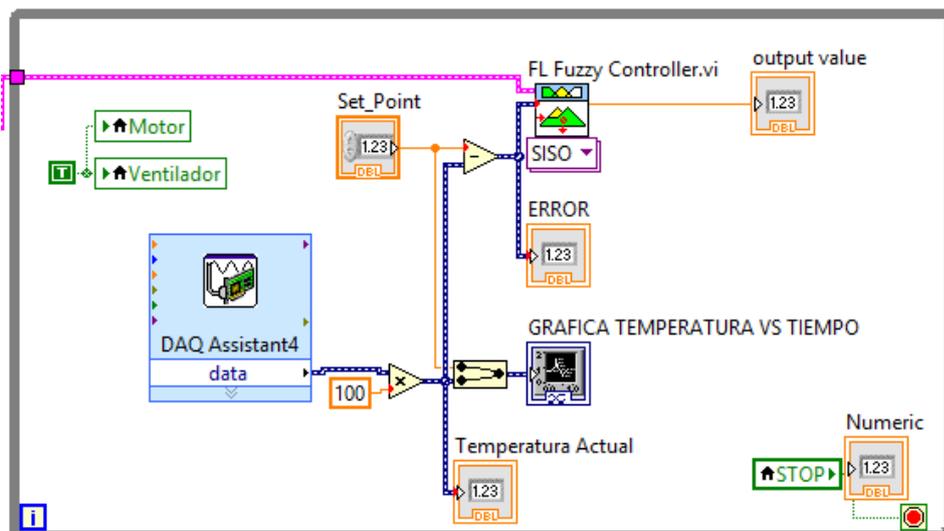


Figura 3. 55: Gráfica de la estructura While completa.  
Elaborado por: Autor.

Para la segunda estructura se creará una del tipo Case dentro de la estructura While, y dentro del Case se creará una tercera estructura llamada Flat Sequence, tal como se muestra en la figura 3.56.

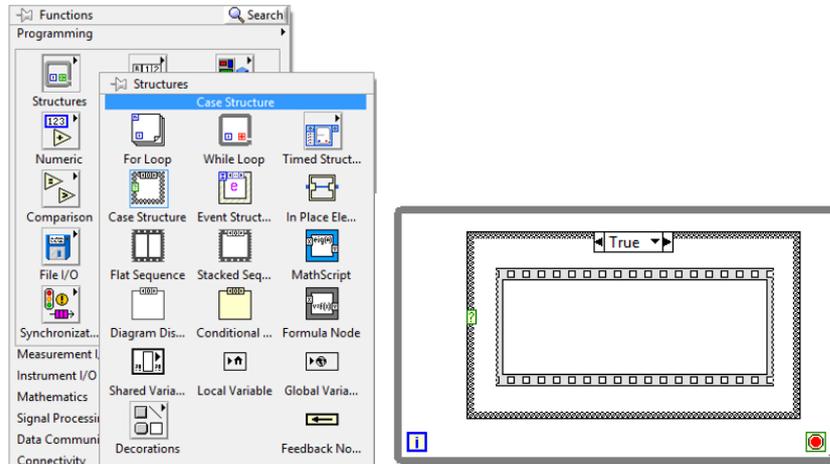


Figura 3. 56: Ubicación y gráfica de las estructuras Case y While.  
Elaborado por: Autor.

En el Flat Sequence se procede a crear una variable local llamada STOP y se crea una constante en ella, asignándole un valor de 1 (true). Para crear un segundo marco dentro del Flat Sequence se da clic derecho, Add Frame After, tal como la figura 3.57.

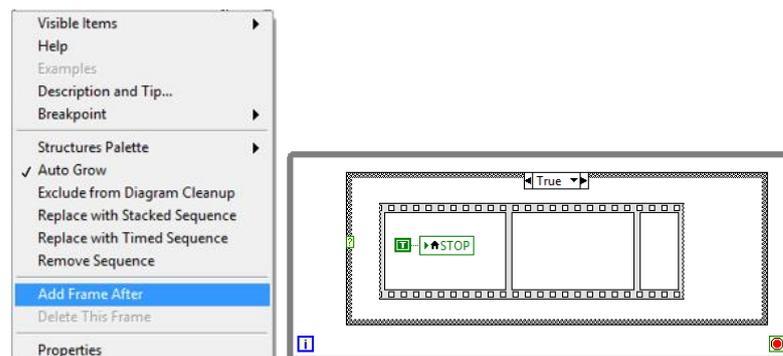


Figura 3. 57: Agregación de un marco.  
Elaborado por: Autor.

En el segundo marco del Flat se agrega 3 variables locales (motor, ventilador y foco), y se crea una constante, pero en este caso será de valor false 0 (véase figura 3.58) para cualquiera de ellas y seguido a esto se conectan las 3 variables.



Figura 3. 58: Configuración variable locales

Elaborado por: Autor.

Posteriormente, se agrega un tiempo de 50 ms usando la herramienta Timing Wait (véase figura 3.59), siendo está una constante y que representa al tiempo, que al inicio se indica que es 50 ms.

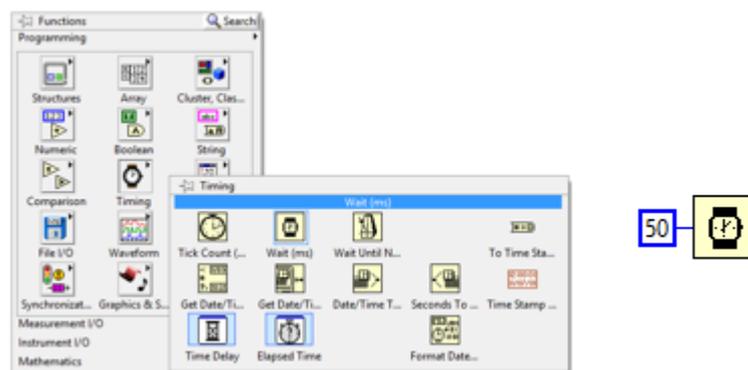


Figura 3. 59: Ubicación del Timing.

Elaborado por: Autor.

Para el último marco se agrega una aplicación de control llamada STOP, en el mismo se crea una constante true1, tal como la figura 3.60.

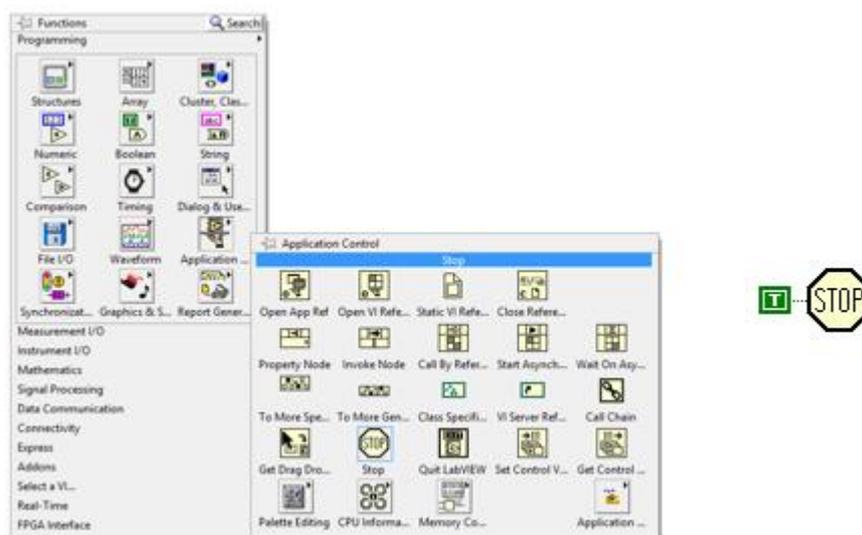


Figura 3. 60: Ubicación y configuración de la herramienta Stop.

Elaborado por: Autor.

Después, se asigna el botón de Stop a la estructura Case, el cual permite detener el proceso en cualquier momento, y para el caso en el que se requiera detener la estructura While es necesario crear una constante con valor false, tal como la figura 3.61.

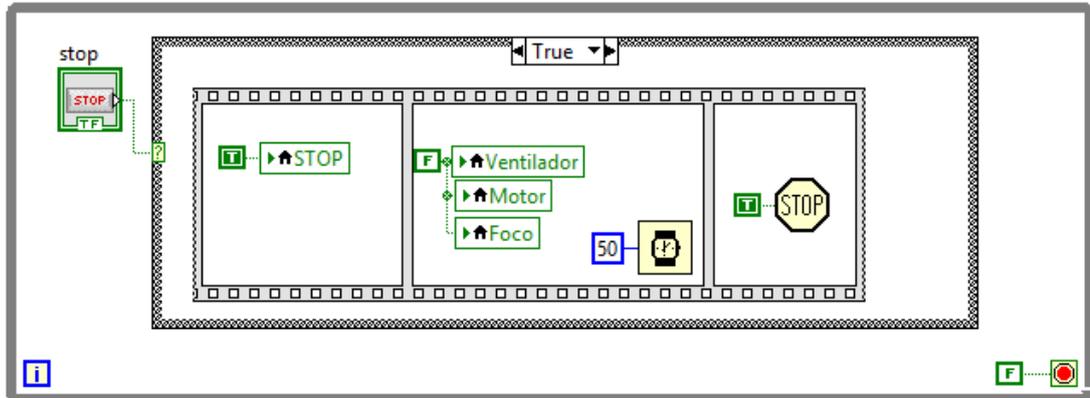


Figura 3. 61: Pulsante Stop en la estructura Case.  
Elaborado por: Autor.

Hay que considerar que para la estructura Case, la programación debe ser realizada en la ventana TRUE. Para añadir una tercera estructura While (ver figura 3.62) nos guiamos de la anterior, y se crea una estructura Flat.

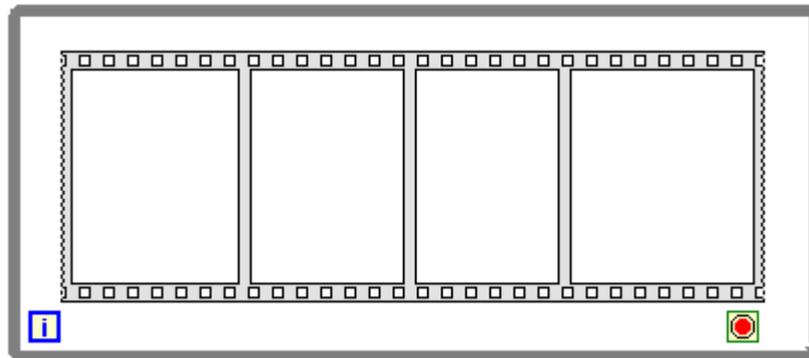


Figura 3. 62: Segmento terminado para tercera estructura Case.  
Elaborado por: Autor.

Para el primer marco de la estructura Flat Sequence será necesario crear una variable local la cual se asignará Foco y a la misma se la setea con un valor True, tal como se ilustra en la figura 3.63.

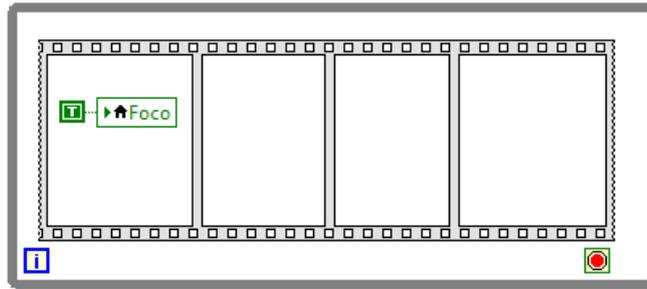


Figura 3. 63: Estructura con variable local.  
Elaborado por: Autor.

Para los siguientes marcos agregados se asigna un Wait y otra variable local (output value). En la estructura While se crea una variable local a la cual se asigna <<output value>> y se modifica el tipo de variable que sea de lectura (ver figura 3.64) y se conecta al Wait ubicado en el segundo marco del Flat Sequence. Y para el cuarto marco se tendrá que conectar el Wait a un restador al cual se le crea una constante de 100, tal como se muestra en la figura 3.65.

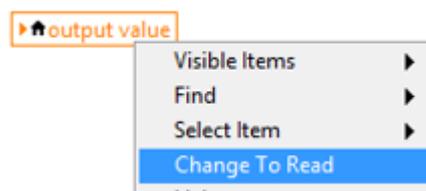


Figura 3. 64: Cambio de variable a lectura.  
Elaborado por: Autor.

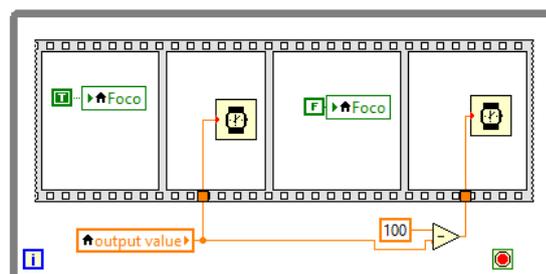


Figura 3. 65: Configuración de la estructura.  
Elaborado por: Autor.

Y para detener esta estructura previamente programada será necesario agregar la variable local <<Stop>> al botón de paro de la estructura While. Finalmente, este segmento del programa queda como el de la figura 3.66.

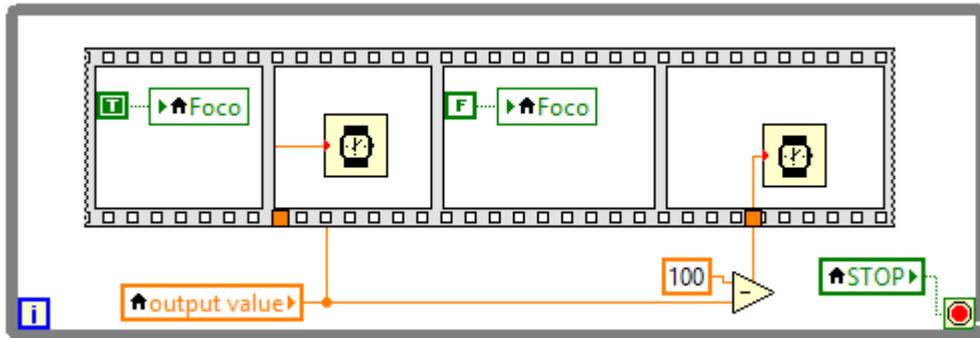


Figura 3. 66: Estructura finalizada.  
Elaborado por: Autor.

### 3.8. Adquisición de datos del sistema de control difuso.

La última estructura del control será la más importante, aquí es donde se obtendrá los datos tomados desde la planta EPC. Y para esto es necesario configurar cada uno de los DAQ de manera individual, es decir, una DAQ para cada una de las tres variables del motor, foco, y ventilador. Posteriormente, se agrega una DAQ (2) dentro de la estructura While para ser configurado como generador de señales, salidas digitales y por último que sea tipo línea, tal como se muestra en la figura 3.67.

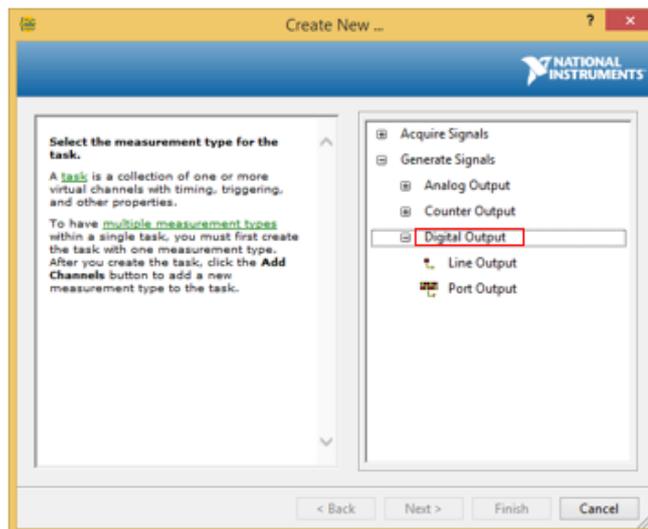


Figura 3. 67: Configuración del DAQ 2.  
Elaborado por: Autor.

Después, se configura el número del puerto del cual se van adquirir los datos, en este caso, este DAQ se lo va a configurar para la variable Foco. Por

lo tanto, esta será digital y se le asignará el puerto port0/line1, tal como se muestra en la figura 3.68.

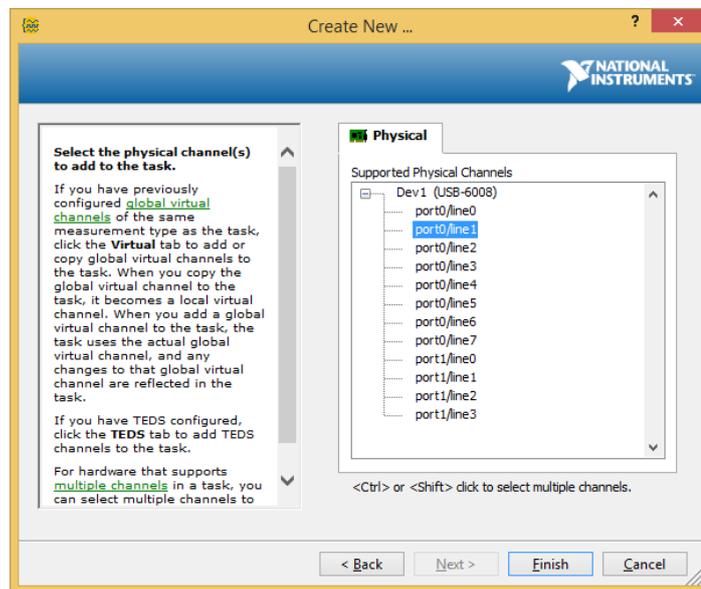


Figura 3. 68: Ventana de configuración del DAQ de la variable “Foco”.  
Elaborado por: Autor.

Una vez seleccionado el puerto (port0/line1), se crea de manera automática la ventana de configuración (véase figura 3.69) en la misma se activa la casilla Invert Line. Se presiona Ok, y ahora el icono del DAQ cambiará un poco, tal como se muestra en la figura 3.70.

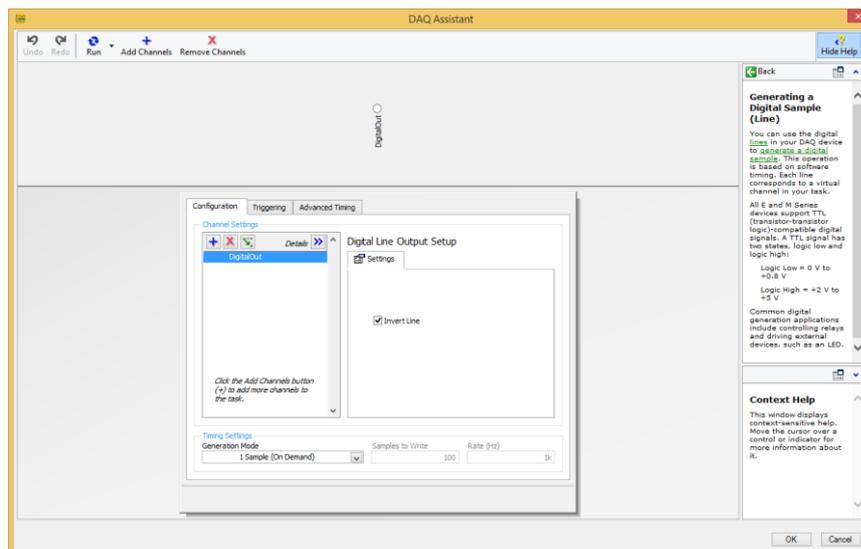


Figura 3. 69: Ventana de configuración y activación de casilla de la DAQ 2.  
Elaborado por: Autor.

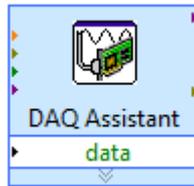


Figura 3. 70: Icono del DAQ Assistant.  
Elaborado por: Autor.

Una vez creado el DAQ se necesita un convertidor de datos el cual se lo encuentra en la función Express, manipulación de señal y seleccionamos la herramienta conversión de datos dinámicos (ver figura 3.71), y se la agrega al diagrama de bloque del sistema controlador.

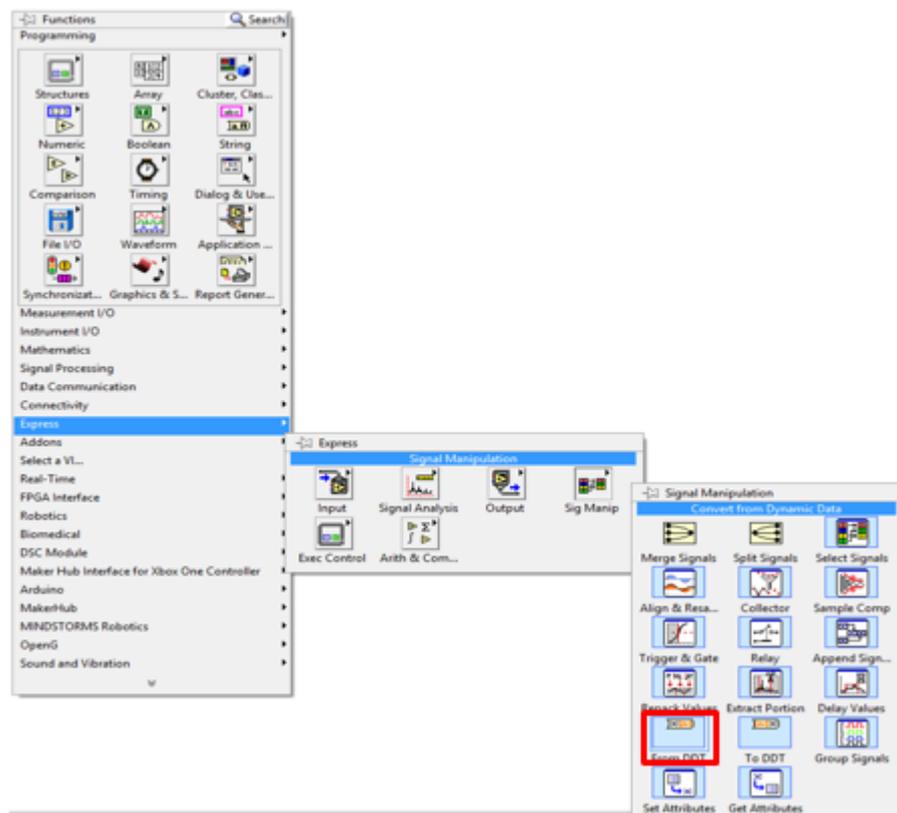


Figura 3. 71: Ubicación de la herramienta del convertidor.  
Elaborado por: Autor.

Se configura el convertidor de datos, seleccionando el tipo de datos Boolean (véase la figura 3.72) y de manera similar a la figura 3.70 el convertidor cambia su apariencia, tal como la figura 3.73.

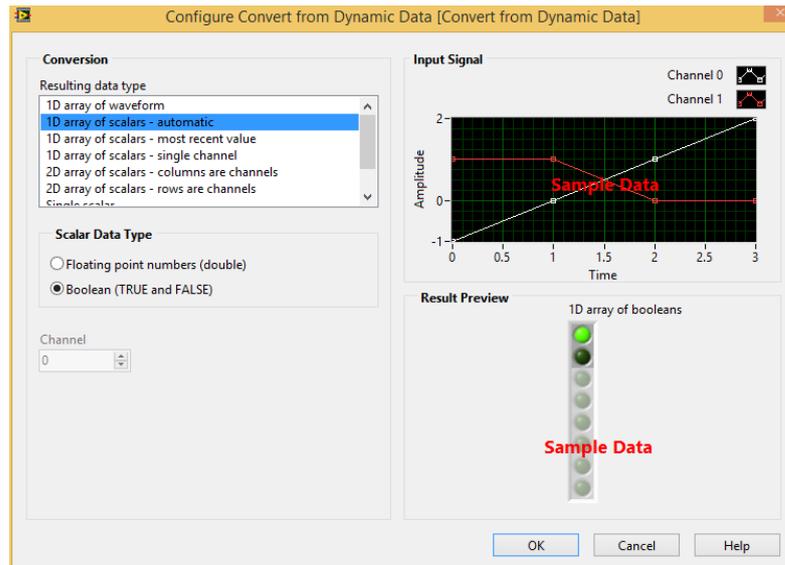


Figura 3. 72: Ventana de propiedades del convertidor.  
Elaborado por: Autor.

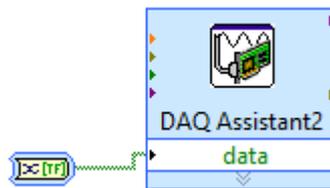


Figura 3. 73: Icono de configuración del DAQ 2.  
Elaborado por: Autor.

Después, se crea una variable local, la cual se cambia a lectura. Se conecta todos los elementos configurados anteriormente tal como se muestra en la figura 3.73.

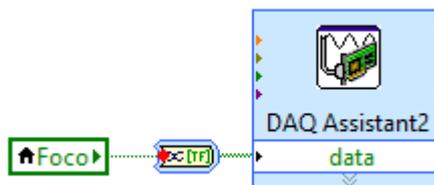


Figura 3. 74: Asignación de una variable local en la DAQ 2.  
Elaborado por: Autor.

Se agrega un tercer bloque del DAQ, este será configurado para la variable ventilador y como salida digital (véase la figura 3.74), se selecciona generar señal (salida digital, líneas de salida).

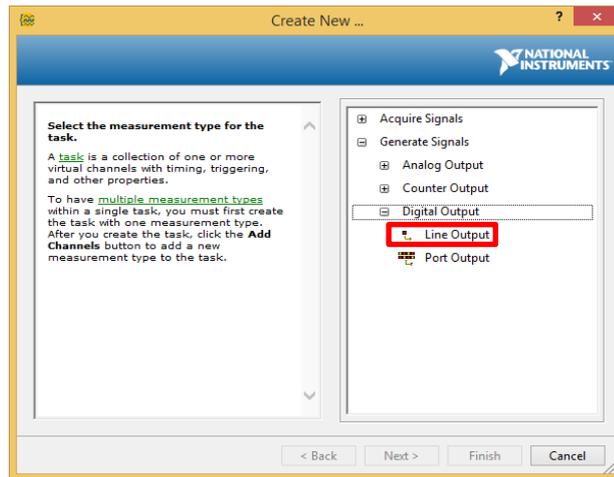


Figura 3. 75: Configuración del tercer DAQ.  
Elaborado por: Autor.

Una vez realizado el proceso anterior lo siguiente sería asignar el número de puerto para esta configuración, el mismo que se asigna al puerto P0.0 (véase figura 3.76) y automáticamente el icono del DAQ cambia (véase figura 3.77). Icono del DAQ ya configurado.

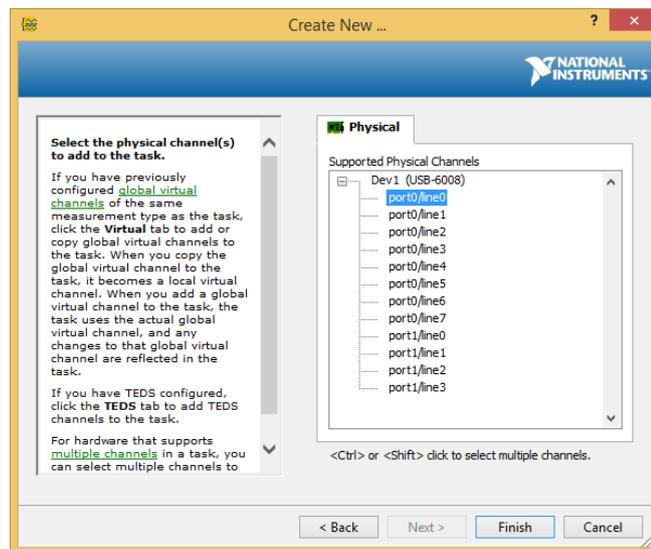


Figura 3. 76: Asignación del puerto del DAQ.  
Elaborado por: Autor.

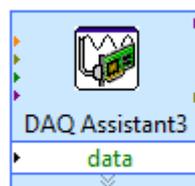


Figura 3. 77: Icono del DAQ terminado.  
Elaborado por: Autor.

Para la DAQ Assistant 3 se realizan las configuraciones hechas para DAQ Assistant 2, finalmente queda la conexión como el de la figura 3.78.

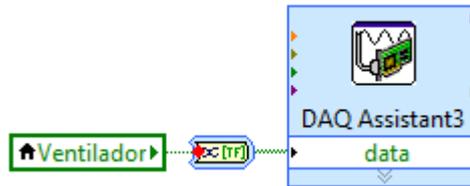


Figura 3. 78: Asignación de variable local al DAQ 3.  
Elaborado por: Autor.

Ahora, se configura el DAQ para el motor DC como una entrada analógica de tipo voltaje en adquisición de señal (véase figura 3.79), y se asigna el puerto Ai0 (ver figura 3.80).

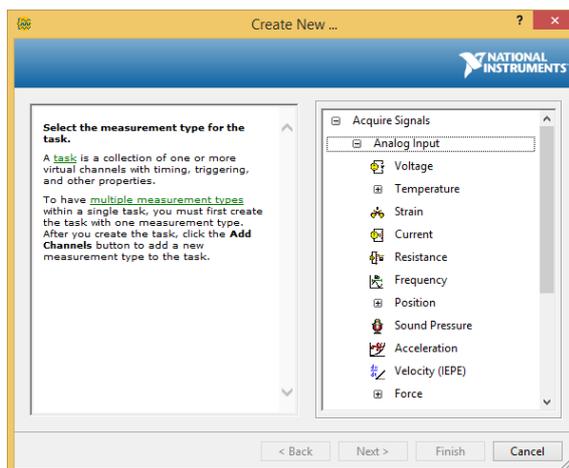


Figura 3. 79: Configuración del DAQ 3 del motor.  
Elaborado por: Autor.

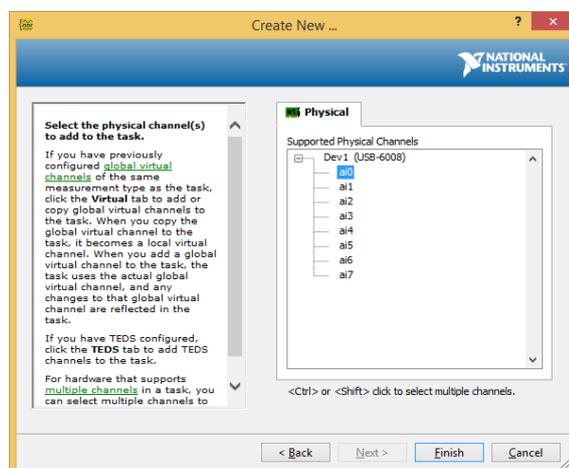


Figura 3. 80: Asignación del puerto del DAQ 3 del motor.  
Elaborado por: Autor.

Cuando se haya realizado la configuración previa ésta sería la ventana del DAQ 3 del motor (véase figura 3.81).

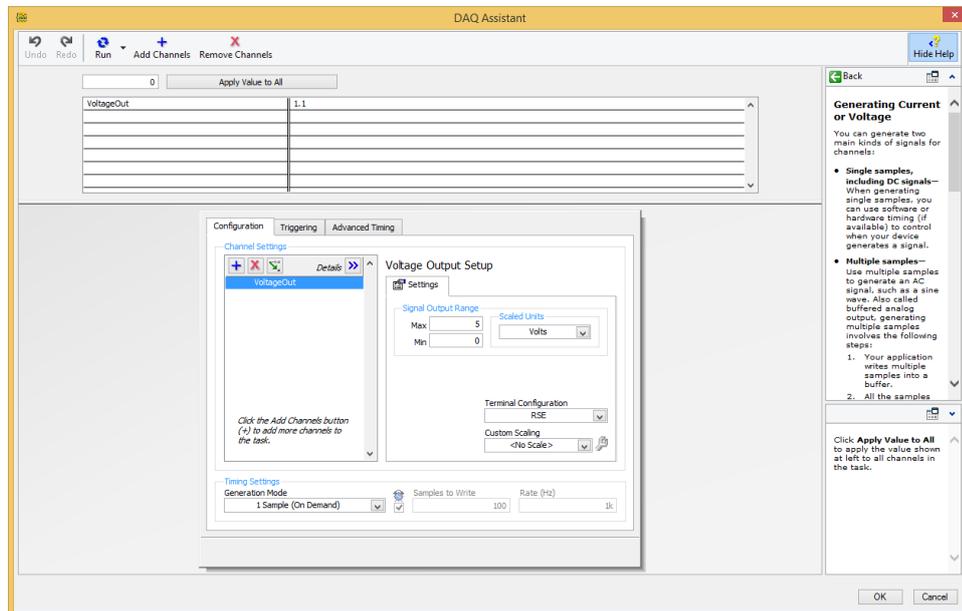


Figura 3. 81: Ventana de configuración y activación de casilla de la DAQ 3. Elaborado por: Autor.

De esta manera concluirá el último segmento de la estructura While 4, creando una constante false (falsa) en el botón de paro del While, tal como se muestra en la figura 3.82. En este segmento se puede observar todos los DAQ configurados y conectados.

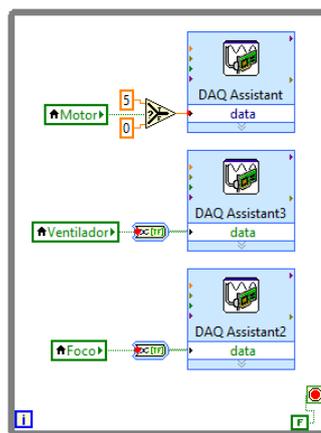


Figura 3. 82: Estructura de adquisición de datos (DAQ) del control difuso. Elaborado por: Autor.

### 3.9. Interfaz gráfica de usuario del sistema de control difuso.

Finalmente, con todos los pasos realizados se obtiene completamente el instrumento virtual (VI) del proceso de control difuso de temperatura, tal como se muestra en la figura 3.83. Se pueden observar cada una de las herramientas explicadas en las secciones anteriores que permitieron lograr el resultado final de la pantalla, véase para llevar a cabo este proceso de control.

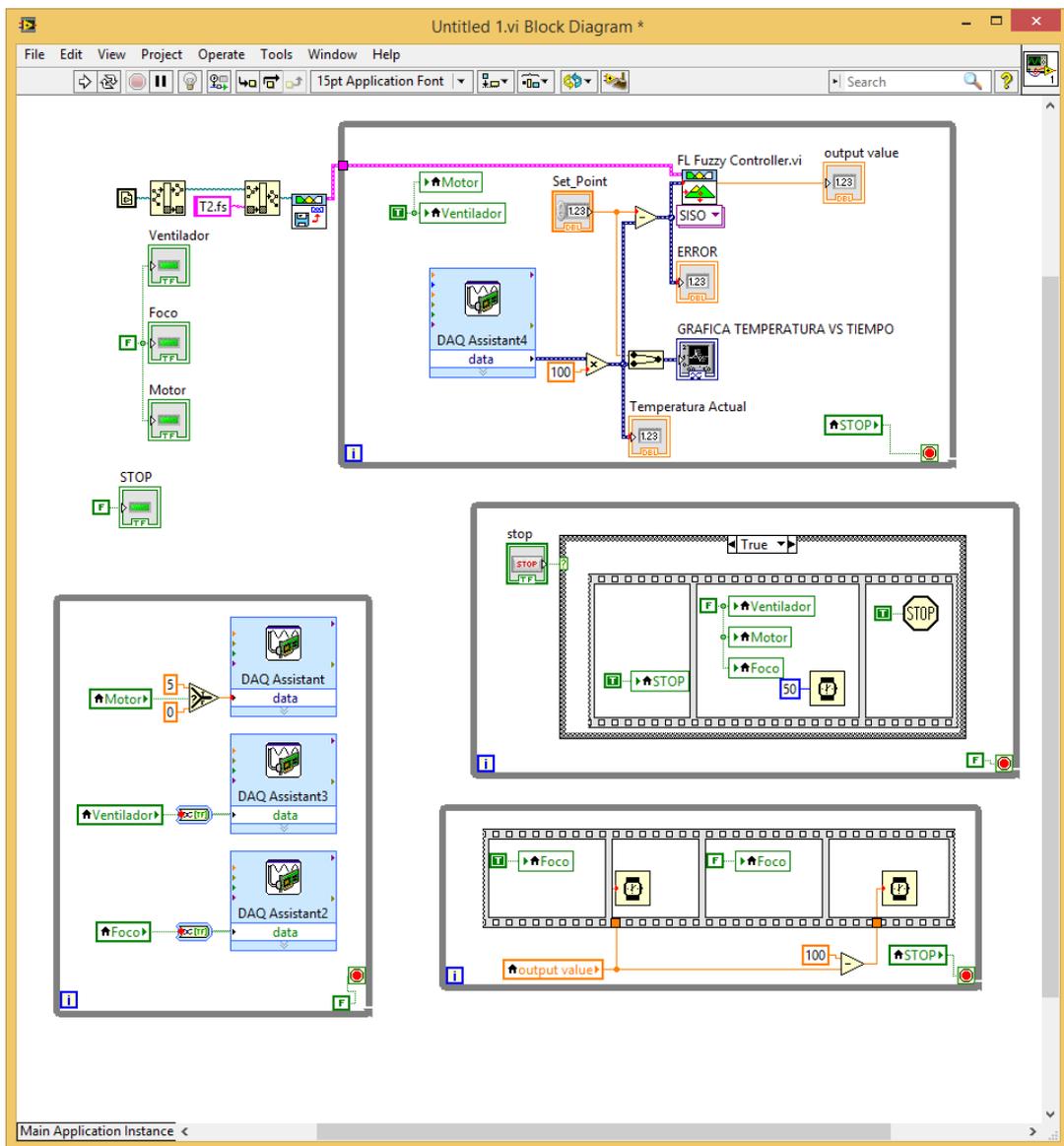


Figura 3. 83: VI programado para el proceso de control difuso.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.84 muestra la interfaz gráfica de usuario (GUIDE) final del sistema de control difuso para protección de motores DC desarrollado, en el mismo se observa todos los elementos configurados en todas las secciones.

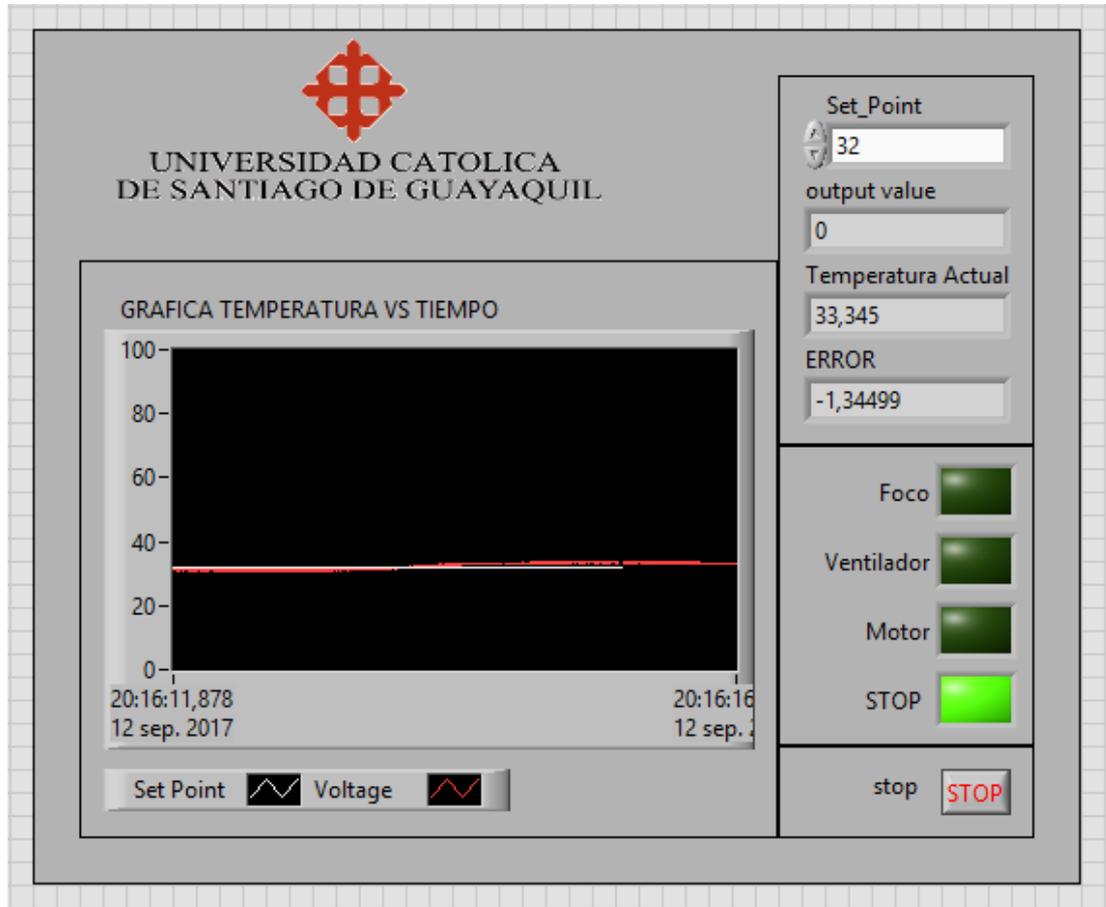


Figura 3. 84: GUIDE para el proceso de control difuso.  
Elaborado por: Autor.

## **CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones.**

### **4.1. Conclusiones**

- El control difuso tiene la ventaja de que puede hacer frente a un sistema no lineal y utilizar el conocimiento del programador. Mientras, que los controladores PID tienen sólo 3 parámetros para ajustar el sistema de control, aunque se sabe que muestra buenos resultados en términos de tiempo de respuesta y precisión cuando estos parámetros están bien ajustados.
- El controlador difuso tiene muchos parámetros, el más importante es realizar una buena elección de la base de reglas y que los parámetros sean bien elegidos, y que la respuesta del sistema tiene características muy buenas del dominio.
- Uno de los problemas más importantes con el controlador difuso es que el tiempo computacional es mucho más largo que para PID, debido a operaciones complejas como Fuzzification y particularmente deFuzzification.

### **4.2. Recomendaciones.**

- Evaluar el comportamiento de los motores de reluctancia conmutada utilizando MatLab/Simulink.
- Implementación del control de velocidad en motores de inducción usando controladores híbridos

## Bibliografía

- Benítez, J. (2015). Control Electrónico de motores. Recuperado el 4 de julio de 2017, a partir de <http://bentz5.blogspot.com/2015/11/control-electronico-de-motores-conceptos.html>
- Bin Muain, M. F. (2010). *Step motor speed controller* (Tesis de Grado). University Malaysia Pahang. Recuperado a partir de [http://umpir.ump.edu.my/2088/1/Muhammad\\_Fauzi\\_Muain\\_%28\\_CD\\_5326\\_%29.pdf](http://umpir.ump.edu.my/2088/1/Muhammad_Fauzi_Muain_%28_CD_5326_%29.pdf)
- Bose, B. K. (2010). *Power Electronics And Motor Drives: Advances and Trends*. Burlington: Elsevier. Recuperado a partir de [http://www.123library.org/book\\_details/?id=34194](http://www.123library.org/book_details/?id=34194)
- BTW. (2016, agosto 11). Difference between DC and AC Motors. Recuperado el 3 de julio de 2017, a partir de <http://www.differencebtw.com/difference-between-dc-and-ac-motors/>
- Circuit Globe. (2016). Printed Circuit Board (PCB) Motor. Recuperado el 4 de julio de 2017, a partir de <http://circuitglobe.com/printed-circuit-board-pcb-motor.html>
- Elmahi, B. (2015). A Review: Fuzzy Logic techniques improve the efficiency of the power system stability. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR - JEEE)*, 10(5), 86–91.
- Fattah, A. (2015). *Design and Analysis of Speed Control Using Hybrid PID-Fuzzy Controller for Induction Motors* (Tesis de Maestría).
- Gieras, J. F. (2010). *Permanent magnet motor technology: design and applications* (3rd ed). Boca Raton: CRC Press.
- Hughes, A. (2006). *Electric motors and drives: fundamentals, types, and applications* (3rd ed). Amsterdam; Boston: Elsevier/Newnes.

- Intplus. (2017). Motor paso a paso unipolar 2 fases tipo 1 [Ventas]. Recuperado el 3 de julio de 2017, a partir de <http://www.superrobotica.com/S330300.htm>
- Kadam, P., & Patki, A. M. (2016). Fuzzy Logic Controller: An Overview and Applications. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, 2(6), 795–797.
- Merigó, J. M., Gil-Lafuente, A. M., & Yager, R. R. (2015). An overview of fuzzy research with bibliometric indicators. *Applied Soft Computing*, 27, 420–433.
- Zuñiga Murillo, S. (2014). Diseño e implementación de un sistema de control para generar diagramas de radiación de antenas utilizando la plataforma PXI. Recuperado a partir de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6850>



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **VILLALBA PACHUCHO, KEVIN RODRIGO** con C.C: # 0924261250 autor del Trabajo de Titulación: **Diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y Software LabView** previo a la obtención del título de **INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO** 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, 22 de Septiembre de 2017

f. \_\_\_\_\_  
Nombre: Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo  
C.C: 0924261250

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y Software LabView		
<b>AUTOR(ES)</b>	Villalba Pachucho, Kevin Rodrigo		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Philco Asqui, Luis Orlando		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería en Eléctrico Mecánica		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Eléctrico Mecánica		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	22 de Septiembre de 2017	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	90
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Controles Eléctricos, Controles Electrónicos y Computación Aplicada		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Motores, DC, AC, controladores, difuso, DAQ		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>El presente trabajo de titulación consiste diseñar un sistema de control difuso de temperatura para la protección de motores DC utilizando la tarjeta de adquisición de datos DAQ a través de instrumentos virtuales en LabView. En la parte introductoria se especifican los antecedentes del problema a investigar a través de dos trabajos relacionados a los controladores difusos, así como la definición del problema a investigar, objetivo general, objetivos específicos, hipótesis y la metodología a utilizar en el desarrollo del trabajo de titulación. En la fundamentación teórica, se describen los elementos que fueron utilizados en el diseño del sistema de control difuso, tales como, motores eléctricos DC y AC, controladores PI-PD-PID y controladores de lógica difusa. La demostración experimental del diseño realizado en LabView del controlador difuso de temperatura para protección de motores DC se utilizan la tarjeta de adquisición de datos DAQ y la planta EPC de National Instrument. El método propuesto incorpora la lógica difusa a través de la herramienta incorporada en LabView. Este método utilizado permitió mejorar la respuesta de protección de motores DC.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-969084518	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:kevindelaplata_69@hotmail.com">kevindelaplata_69@hotmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Philco Asqui Luis Orlando		
	<b>Teléfono:</b> +593-4-2202935 ext. 2007		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:luis.philco@cu.ucsg.edu.ec">luis.philco@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>No. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>No. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			