

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,**  
**ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**ELÉCTRICA**



**“METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN CONTROLADOR  
DIFUSO APLICADO A HORNOS INDUSTRIALES DE  
PETRÓLEO”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**WILDO FELIPE QUENTA CCASO**  
**ELOY RUBEN HANCCO CHAMBI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,**  
**ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**ELÉCTRICA**

**“METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO**  
**APLICADO A HORNOS INDUSTRIALES DE PETRÓLEO”**

TESIS PRESENTADA POR:

**WILDO FELIPE QUENTA CCASO**  
**ELOY RUBEN HANCCO CHAMBI**



PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:**

**PRESIDENTE**

:

-----  
 Dr. NORMAN JESUS BELTRAN CASTAÑÓN

**PRIMER MIEMBRO**

:

-----  
 M.Sc. MATEO ALEJANDRO SALINAS MENA

**SEGUNDO MIEMBRO**

:

-----  
 M.Sc. ANGEL MARIO HURTADO CHAVEZ

**DIRECTOR / ASESOR**

:

-----  
 M.Sc. JOSE MANUEL RAMOS CUTIPA

**ÁREA:** Control de Procesos.

**TEMA:** Diseño de un Controlador Difuso.

**FECHA DE SUSTENTACIÓN 04 DE DICIEMBRE DEL 2019**

## DEDICATORIA

*A dios todo poderoso, por estar siempre conmigo por iluminarme y guiar mi camino por permitirme conocer la vida, la paz, el cariño el amor. Por permitirme a que se convierta en realidad este maravilloso sueño el ser un profesional competente.*

*A la Universidad Nacional Del Altiplano – Puno, por ser el alma mater, y por permitirme formarme profesionalmente, A mis docentes de la escuela profesional de ingeniería mecánica eléctrica, por colaborar e inculcarme los valores y conocimientos teóricos y prácticos en mi formación profesional incentivándome en seguir adelante.*

*A mis padres Felipe y Livia, por su constante apoyo económico y moral y por su sacrificio y su dedicación, por educarme con buenos reflejos. A mi padre por su apoyo moral, Por ser una inspiración constante para salir adelante y no desistir nunca, a mi madre por su amor y cariño, que siempre estuvo pendiente de mí. Les dedico este proyecto de investigación a ustedes padres, porque ustedes han sabido formarme con buenos principios y valores.*

**Wuïdo Felipe Quenta Ccaso.**

*Desde lo más profundo de mi corazón le doy gracia a Dios, por haberme dado la fuerza espiritual para lograr mis metas y haberme dado la salud, y a su infinita bondad y amor, La fuerza, fe, voluntad, valentía y paciencia son muchas cualidades y virtudes que desarrollamos o aprendemos a lo largo del camino, sin embargo, a veces nos topamos con personas que nos ayudan a comprenderla y adoptarlas en el momento justo y necesario.*

*A mis, padres, hermanos y el Programa Nacional de Becas y Créditos Educativo, por su infinito apoyo para poder lograr esta meta, a mis amigos por su profunda colaboración, por aporta conocimientos y grandes valores como la amistad, a mis profesores de la universidad nacional del altiplano- puno por el conocimiento compartido, para hacer posible conseguir mi título profesional.*

**Eloy Rubén Hancco Chambi.**

## AGRADECIMIENTO

*Primeramente agradezco a Dios, por permitirme conocer la vida, la luz, por ayudarme a comprender mis errores y a superarlos, por forjar mi camino correcto hacia el éxito, por permitirme que me convierta en un ser profesional que tanto anhelaba. Eres quien guía mi destino, te agradezco eternamente padre celestial.*

*Agradezco a la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, a la Facultad De Ingeniería Mecánica Eléctrica Electrónica y Sistemas, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por haberme brindado los conocimientos y saberes de la ciencia y por permitir formarme profesionalmente.*

*A los Jurados y Asesor, por haberme inculcado con sus buenos valores, conocimientos y experiencias en mi formación profesional y a la labor que se tomaron en revisar y aportar a mi proyecto de investigación. En especial agradezco a mi Asesor de ante mano por su, orientación, atención, conocimiento y experiencia, que fue posible desarrollar e ejecutar este proyecto de investigación.*

*A mi Padre Felipe a mi Madre Livia, Hermanos y Familiares, por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mí y en mis expectativas.*

*A Dalila M. L., por su comprensión y apoyo incondicionalmente en mi vida. Te agradezco por la perseverancia no solo para el desarrollo de este proyecto de investigación, sino también para mi vida.*

*Wuildo Felipe Quenta Ccaso.*

*A Dios que nos brinda la sabiduría y las capacidades necesarias, con las cuales podemos llevar a cabo este proyecto y culminar nuestra carrera.*

*A la facultad de ingeniería mecánica eléctrica electrónica y sistemas, por su colaboración dada y facilitar los medios para cumplir a cabalidad con este trabajo.*

*Damos gracias a aquellos docentes que, de otra forma colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, y hacemos un extensivo nuestros más sinceros agradecimientos a los docentes: M. Sc. José Manuel Ramos Cutipa, Dr. Norman Jesús Beltrán Castañón, M. Sc. Mateo Alejandro Salinas Nema, M Sc. Ángel Mario Hurtado Chávez.*

*Eloy Rubén Hanco Chambi.*



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	10
ÍNDICE DE TABLAS .....	13
ÍNDICE DE ANEXOS .....	14
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	15
RESUMEN .....	16
ABSTRACT.....	17

## CAPÍTULO I

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>18</b>
1.1. Descripción del problema .....	19
1.2. Formulación del problema .....	20
1.2.1. Problema general .....	20
1.2.2. Problema específicos .....	20
1.3. Justificación del proyecto de investigación .....	20
1.4. Objetivos del proyecto de investigación .....	21
1.4.1. Objetivo general.....	21
1.4.2. Objetivos específicos .....	21
1.5. Hipótesis de la investigación .....	21
1.5.1. Hipótesis general.....	21
1.5.2. Hipótesis específicas.....	22

## CAPÍTULO II

<b>REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>23</b>
2.1. Antecedentes de la investigación .....	23
2.2. Sustento teórico.....	27
2.2.1. Teoría de control .....	27
2.2.2. División de controladores. ....	28
2.2.2.1. Control convencional.....	29
2.2.2.2. Control moderno .....	30
2.2.2.3. Control no convencional.....	31
2.2.2.4. Términos básico de la teoría de control .....	31
2.2.3. Clasificación de sistemas de control.....	34

2.2.3.1. Control en lazo abierto.....	34
2.2.3.2. Control en lazo cerrado.....	34
2.2.4. Lógica difusa.....	36
2.2.4.1. Introducción a la lógica difusa.....	36
2.2.4.2. Utilidad de la lógica difusa .....	37
2.2.4.3. Inventor de la lógica difusa.....	37
2.2.5. Conjuntos difusos .....	38
2.2.6. Universo de discurso.....	38
2.2.6.1. Notación del universo de discursos .....	38
2.2.7. Función de membresía $\mu(x)$ .....	39
2.2.7.1. Características de la función de membresía.....	40
2.2.7.2. Tipos de funciones de membresía.....	41
2.2.7.3. Formas especiales de la función de membresía .....	44
2.2.7.4. Funciones de membresías típicas.....	46
2.2.8. Operaciones de conjuntos difusos.....	50
2.2.8.1. Subconjunto difuso .....	50
2.2.8.2. Unión de conjunto difuso.....	51
2.2.8.3. Intersección de conjunto difuso .....	52
2.2.8.4. Complemento del conjunto difuso.....	53
2.2.9. Propiedad de las operaciones difusas.....	54
2.2.10. Otras operaciones de relaciones difusas .....	56
2.2.11. Operadores difusos generalizados .....	58
2.2.11.1. Operador difuso norma t.....	58
2.2.11.2. Operador difuso norma s.....	59
2.2.11.2.1. Complemento difuso.....	59
2.2.12. Razonamiento difuso .....	60
2.2.13. Controlador difuso .....	62
2.2.13.1. Ventajas del control difuso .....	62
2.2.13.2. Desventajas del control difuso .....	62
2.2.13.3. Aplicaciones del control difuso .....	62
2.2.13.4. Diagrama de bloques del control difuso .....	63
2.2.13.5. Variables lingüísticas (vl) .....	63
2.2.13.6. Pre procesamiento.....	64
2.2.13.7. Reglas del control .....	64

2.2.13.8. Método de inferencia .....	64
2.2.13.9. Fusificación.....	65
2.2.13.10. Defusificación .....	65
2.2.13.11. Post - procesamiento .....	66
2.2.13.12. Método de inferencia de mandani.....	66
2.2.13.12.1. Método de inferencia de tsukamoto.....	68
2.2.14. Teoría de combustión.....	69
2.2.14.1. Introducción .....	69
2.2.14.2. Combustible .....	69
2.2.14.3. Comburente.....	70
2.2.14.4. Combustión.....	70
2.2.14.5. Composición del aire .....	70
2.2.14.6. Ecuación de combustible .....	71
2.2.14.7. Combustión completa .....	72
2.2.14.8. Combustión incompleta .....	72
2.2.14.9. Aire estequiometrico o teórico.....	72
2.2.14.10. Combustión estequiometrico o teórico .....	72
2.2.14.11. Relación aire combustible.....	72
2.2.14.12. Relación combustible aire.....	72
2.2.14.13. Combustión ideal con aire .....	73
2.2.14.13.1. Combustión real .....	73
2.2.14.13.2. Combustión ideal con exceso de aire.....	73
2.2.15. Sensor de temperatura.....	74
2.2.15.1. Termopares .....	75
2.2.15.2. Rtd (detector de temperatura resistiva) .....	76
2.2.15.3. Termistores .....	77
2.2.15.4. Infrarrojo.....	77
2.2.15.5. Sensor de temperatura pt-100 .....	77
2.2.16. Selección de un sensor de temperatura .....	78
2.2.17. sensor de detección de calidad de aire .....	78
2.2.18. Controlador lógico programable (plc) .....	81
2.2.18.1. Funcionamiento básico .....	82
2.2.18.2. Principales aplicaciones .....	82
2.2.18.3. Ventajas y desventajas de los PLC .....	83

2.2.18.4. Partes Del Plc.....	84
2.2.18.5. Clasificación de los PLC's.....	85

### CAPÍTULO III

<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>87</b>
3.1. Tipo y diseño de la investigación .....	87
3.2. Población y muestra de la investigación.....	87
3.3. Ubicación y descripción de la población. ....	88
3.3.1. Ubicación de la población.....	88
3.3.2. Descripción de la población.....	88
3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos .....	88
3.5. Descripción de materiales experimentales.....	89
3.5.1. Plc logo siemens 6ed1.....	89
3.5.2. Módulo de expansión analógica .....	91
3.5.3. Pulsadores y señalizadores.....	91
3.5.4. Terminales tipo pin solido .....	92
3.5.5. Electroválvula modular cr - 02t .....	93
3.5.6. Sensor de temperatura pt-100 din-b.....	94
3.5.7. Sensor mq – 6 y mq – 9 .....	96
3.5.8. Compensora de aire .....	96
3.5.9. Riel din.....	97
3.6. Diseño del módulo de control.....	98
3.7. Diseño mecánico del prototipo experimental .....	99
3.8. Diseño del diagrama experimental .....	101
3.8.1. Proceso experimental.....	102
3.9. Diseño del controlador difuso.....	102
3.9.1. Diagrama de bloques con problema servo.....	102
3.9.2. Diagrama de bloques con problema regulado.....	103
3.9.3. Método de inferencia de mandani.....	105
3.9.4. Método de inferencia de tsukamoto.....	110
3.10. Software de procesamiento de datos.....	114
3.10.1. Matlab (matrix laboratory).....	114
3.10.2. Labview .....	115
3.11. Adquisición de datos experimentales .....	115

3.11.1.1. Adquisición de datos sensor de temperatura.....	123
3.11.1.2. Adquisición de datos sensor mq-6 y mq-9.....	124
3.11.1.3. Corriente inyectado electroválvula .....	125
3.11.1.4. Datos asignados al ingreso de combustible .....	126
3.12. Procesamiento y análisis de datos.....	126

## CAPÍTULO IV

<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>130</b>
4.1. Prueba experimental N° 01 Método de Mandani.....	130
4.2. Prueba experimental N° 02 Método de Mandani.....	131
4.3. Prueba experimental N° 03 Método de Mandani.....	133
4.4. Prueba N° 04 Método de Tsukamoto.....	135
4.5. Prueba experimental N° 05 Método de Tsukamoto.....	136
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>138</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>140</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>141</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>145</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Sistemas de control en lazo abierto.....	34
<b>Figura 2.2:</b> Sistema de Control de Lazo Cerrado .....	35
<b>Figura 2.3:</b> Valores de veracidad de lógica clásica .....	36
<b>Figura 2.4:</b> Valores de veracidad de la lógica difusa.....	37
<b>Figura 2.5:</b> Función de Membresía $\mu(x)$ .....	40
<b>Figura 2.6:</b> Características de la función de membresía.....	40
<b>Figura 2.7:</b> Función de membresía normal y subnormal.....	41
<b>Figura 2.8:</b> Función de membresía simétricas y no simétricas.....	42
<b>Figura 2.9:</b> Función de membresía abierta a la derecha .....	42
<b>Figura 2.10:</b> Función de membresía abierta a la izquierda.....	43
<b>Figura 2.11:</b> Función de membresía cerrada .....	43
<b>Figura 2.12:</b> Función de membresía convexas y no convexas .....	44
<b>Figura 2.13:</b> Función de Membresía Singleton .....	44
<b>Figura 2.14:</b> Función de Membresía de Conjunto Cortado .....	45
<b>Figura 2.15:</b> Función de Membresía Triangular.....	46
<b>Figura 2.16:</b> Función de membresía trapezoidal .....	47
<b>Figura 2.17:</b> Función de membresía tipo gaussiana .....	48
<b>Figura 2.18:</b> Función campana generalizada .....	49
<b>Figura 2.19:</b> Grafico función Sigmoidal.....	50
<b>Figura 2.20:</b> Grafico subconjunto difuso.....	51
<b>Figura 2.21:</b> Grafico unión de conjuntos difusos .....	52
<b>Figura 2.22:</b> Intersección de conjuntos difusos .....	53
<b>Figura 2.23:</b> Complemento de Conjunto Difuso .....	53
<b>Figura 2.24:</b> Relación Difusa.....	56
<b>Figura 2.25:</b> Diagrama de bloques del control difuso .....	63
<b>Figura 2.26:</b> Fusificación del método de Mandani .....	67
<b>Figura 2.27:</b> Inferencia difusa de Mandani.....	68
<b>Figura 2.28:</b> Inferencia difusa de Tsukamoto.....	69
<b>Figura 2.29:</b> Cámara de combustión.....	71
<b>Figura 2.30:</b> Sensores de temperatura .....	75
<b>Figura 2.31:</b> Sensores de tipo MQ.....	79
<b>Figura 2.32:</b> Autómatas programables .....	82



<b>Figura 2.33:</b> Especificación de un micro PLC.....	86
<b>Figura 3.1:</b> Plc Logo Siemens 6ED1 .....	89
<b>Figura 3.2:</b> Partes del Plc Logo Siemens 6ED1 .....	90
<b>Figura 3.3:</b> Conexión De Plc Logo Siemens .....	90
<b>Figura 3.4:</b> Módulo de entrada y salida analógica Logo 6ED1 .....	91
<b>Figura 3.5:</b> Pulsadores y señalizadores.....	92
<b>Figura 3.6:</b> Terminales tipo pin solido .....	92
<b>Figura 3.7:</b> Electroválvula Modular 02T .....	93
<b>Figura 3.8:</b> Diagrama de conexión electroválvula modular .....	94
<b>Figura 3.9:</b> Grafico de ángulo de rotación electroválvula modular.....	94
<b>Figura 3.10:</b> Tensor de Temperatura PT - 100 .....	95
<b>Figura 3.11:</b> Esquema de conexión del sensor MQ.....	96
<b>Figura 3.12:</b> Compresora de aire de 1.5 HP .....	97
<b>Figura 3.13:</b> Riel Din metálico de aluminio .....	98
<b>Figura 3.14:</b> Estructura y armado del módulo de control .....	99
<b>Figura 3.15:</b> Tanque de presión para combustible gaseoso .....	100
<b>Figura 3.16:</b> Quemador metálico de bronce .....	100
<b>Figura 3.17:</b> Tubo de escape y chimenea .....	101
<b>Figura 3.18:</b> Diagrama del proceso experimental.....	101
<b>Figura 3.19:</b> Diagrama de control con problema servo .....	102
<b>Figura 3.20:</b> Grafica de estabilidad experimental con problema servo .....	103
<b>Figura 3.21:</b> Diagrama de bloques con problema regulado.....	103
<b>Figura 3.22:</b> Grafica de estabilidad experimental con problema regulado.....	104
<b>Figura 3.23:</b> Diseño del control difuso en FuzzyLogicDesigner.....	104
<b>Figura 3.24:</b> Representación gráfica FM. V. Temperatura.....	106
<b>Figura 3.25:</b> Representación gráfica FM. V. Contaminación.....	107
<b>Figura 3.26:</b> Representación gráfica FM. V. corriente .....	108
<b>Figura 3.27:</b> Fusificación y Defusificación M. Mandani .....	109
<b>Figura 3.28:</b> Superficie de control M. Mandani .....	110
<b>Figura 3.29:</b> Grafico función de membresía V.T .....	111
<b>Figura 3.30:</b> Grafico función de Membresía T. lingüísticos V.C.....	112
<b>Figura 3.31:</b> Grafico Función de Membresía T. lingüísticos V.I .....	113
<b>Figura 3.32:</b> Reglas de control M. TSKM.....	114
<b>Figura 3.33:</b> Gráfica Superficie de Control M. TSKM .....	114

<b>Figura 3.34:</b> Diagrama de Control con el Software LogoSoft.....	116
<b>Figura 3.35:</b> Grafica Temperatura (14 a 132) °C .....	124
<b>Figura 3.36:</b> Grafica CO & Tiempo .....	124
<b>Figura 3.37:</b> Grafica CH4 & Tiempo .....	125
<b>Figura 3.38:</b> Grafica Corriente & Tiempo .....	125
<b>Figura 3.39:</b> Grafica de estabilidad de la Electroválvula 02T .....	127
<b>Figura 3.40:</b> Gráfica de estabilidad del sensor MQ - 9.....	129
<b>Figura 4.1:</b> Fusificación Control Difuso a T.R de 120°C.....	130
<b>Figura 4.2:</b> Grafica experimental con problema servo .....	131
<b>Figura 4.3:</b> Respuesta de la corriente Prueba N° 1 .....	131
<b>Figura 4.4:</b> Fusificación del Control Difuso a T.R de 200°C.....	132
<b>Figura 4.5:</b> Grafica Experimental con Problema Servo P. N° 2.....	132
<b>Figura 4.6:</b> Respuesta de la Corriente Prueba N° 2.....	133
<b>Figura 4.7:</b> Fusificación y Defusificación Control Fuzzy P. N° 03.....	134
<b>Figura 4.8:</b> Grafica experimental con problema regulado - Prueba N° 3.....	134
<b>Figura 4.9:</b> Respuesta de la Corriente Prueba N° 3.....	135
<b>Figura 4.10:</b> Comportamiento del Control Difuso TSKM a T.R de 14 a 130°C.....	135
<b>Figura 4.11:</b> Grafica experimental T, CO, CH4 a T.R de 14 a 130 °C .....	136
<b>Figura 4.12:</b> Comportamiento del Control Difuso TSKM a T.R de 100 a 200°C.....	137
<b>Figura 4.13:</b> Grafica experimental T, CO, CH4 a T.R de 150 a 200 °C .....	137

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1:</b> Propiedad conmutativa de conjuntos difusos .....	54
<b>Tabla 2.2:</b> Razonamiento de proposiciones clásicas.....	60
<b>Tabla 2.3:</b> Razonamiento de proposiciones difusas.....	60
<b>Tabla 2.4:</b> Tipos de sensores termopar .....	75
<b>Tabla 2.5:</b> Tipos de sensores RTDs .....	76
<b>Tabla 2.6:</b> Tipos de sensores termistores .....	77
<b>Tabla 2.7:</b> Sensores tradicionales según campo .....	78
<b>Tabla 2.8:</b> Modelo de sensores de calidad de aire .....	80
<b>Tabla 3.1:</b> Ubicación de la población .....	88
<b>Tabla 3.2:</b> Técnicas e instrumentos .....	88
<b>Tabla 3.3:</b> Variables lingüísticas de entradas y Salidas .....	104
<b>Tabla 3.4:</b> Determinación del universo de discurso de las variables .....	105
<b>Tabla 3.5:</b> Valores lingüístico de la V. temperatura .....	105
<b>Tabla 3.6:</b> Conjunto difuso y función de Membresía V. Temperatura.....	106
<b>Tabla 3.7:</b> Términos Lingüístico V. Contaminación .....	106
<b>Tabla 3.8:</b> Conjuntos difusos y FM. V. Contaminación .....	107
<b>Tabla 3.9:</b> Términos lingüísticos V. Corriente .....	107
<b>Tabla 3.10:</b> Conjuntos difusos y función de membresía V. Corriente.....	108
<b>Tabla 3.11:</b> Reglas de control difuso variables (T, CON, I) .....	108
<b>Tabla 3.12:</b> Términos lingüístico V. temperatura M. Tsukamoto .....	110
<b>Tabla 3.13:</b> Conjuntos difuso y F.M V. Temperatura.....	111
<b>Tabla 3.14:</b> Términos Lingüísticos V. Contaminación M. Tsukamoto .....	111
<b>Tabla 3.15:</b> Conjuntos Difuso y F.M V. Contaminación.....	112
<b>Tabla 3.16:</b> Términos Lingüísticos V. Corriente M. Tsukamoto .....	112
<b>Tabla 3.17:</b> Conjuntos Difuso y F.M V. Corriente .....	113
<b>Tabla 3.18:</b> Adquisición de Datos Experimentales.....	116

**ÍNDICE DE ANEXOS**

<b>ANEXO 1:</b> ESTRUCTURA DE MÓDULO DE CONTROL .....	145
<b>ANEXO 2:</b> MÓDULO DE CONTROL IMPLEMENTADO .....	145
<b>ANEXO 3:</b> ENCENDIDO DEL QUEMADOR DE COMBUSTIBLE.....	146
<b>ANEXO 4:</b> VISTA DEL QUEMADOR A FULL CONTAMINACIÓN.....	146
<b>ANEXO 5:</b> VISTA DE LLAMA, MESCLA AIRE COMBUSTIBLE.....	147
<b>ANEXO 6:</b> BARÓMETRO DEL TANQUE DE COMBUSTIBLE.....	147
<b>ANEXO 7:</b> PROGRAMACIÓN GRAFICA SOFTWARE LOGOSOFT .....	148
<b>ANEXO 8:</b> VARIABLES LINGÜÍSTICAS DE ENTRADAS Y SALIDAS .....	148
<b>ANEXO 9:</b> FUNCIONES DE MEMBRESÍA VARIABLE TEMPERATURA .....	149
<b>ANEXO 10:</b> FUNCIONES DE MEMBRESÍA VARIABLE CONTAMINACIÓN...	149
<b>ANEXO 11:</b> FUNCIONES DE MEMBRESÍA VARIABLE CORRIENTE .....	150
<b>ANEXO 12:</b> REGLAS DE CONTROL INFERENCIA DE MANDANI .....	150
<b>ANEXO 13:</b> FUSIFICACIÓN Y DEFUSIFICACIÓN METODO MANDANI.....	151
<b>ANEXO 14:</b> SUPERFICIE DE CONTROL MÉTODO DE MANDANI .....	151
<b>ANEXO 15:</b> V. DE ENTRADA Y SALIDA MÉTODO TSUKAMOTO.....	152
<b>ANEXO 16:</b> REGLAS Y SUPERFICIE DE CONTROL M. TSUKAMOTO .....	152
<b>ANEXO 17:</b> DATOS EXPERIMENTALES M. MAMDANI .....	153
<b>ANEXO 18:</b> GRAFICO EXPERIMENTAL M. MANDANI.....	156
<b>ANEXO 19:</b> DATOS EXPERIMENTALES M. TSUKAMOTO .....	157
<b>ANEXO 20:</b> GRAFICO EXPERIMENTAL M. TSUKAMOTO .....	160

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
<b>CO:</b>	Monóxido de carbono
<b>CH4:</b>	Gas Metano
<b>PID:</b>	Proporcional, Integral, Derivativo
<b>PLC:</b>	Controlador Lógico Programable
<b>CPU:</b>	Unidad de procesamiento central
<b>A:</b>	Variable Lingüística
<b>X:</b>	Universo de discurso
<b><math>x</math>:</b>	Elemento del Conjunto Difuso
<b><math>\mu_A(x)</math>:</b>	Función de Membresía o Pertenencia
<b><math>A_\alpha</math>:</b>	Conjunto cortado en alfa
<b><math>\alpha</math>:</b>	Función de membresía limite
<b><math>A_1, B_1</math>:</b>	Términos lingüísticos
<b>RTD:</b>	Detector de temperatura resistiva
<b>NTC:</b>	Coefficiente de temperatura negativa
<b>PTC:</b>	Coefficiente de temperatura positiva
<b>F.M:</b>	Función de Membresía
<b>V.L:</b>	Variable Lingüística
<b>T.L:</b>	Termino lingüístico
<b><math>A \cup B</math>:</b>	Unión de conjuntos Difusos
<b><math>A \cap B</math>:</b>	Intersección de conjuntos difusos
<b><math>\mathcal{R}</math>:</b>	Relación difusa
<b>I:</b>	Implicación difusa
<b><math>\mu_{\mathcal{R}}(x, y)</math>:</b>	Valor de membresía de la relación
<b>PPM:</b>	Partes por millón
<b>GLP:</b>	Gas licuado de petróleo
<b>MQ:</b>	Sensor de gas
<b>mA:</b>	Miliamperio
<b>PSI:</b>	Libra de fuerza por pulgada

## RESUMEN

El presente proyecto de investigación titulado, “Metodología para el Diseño de un Controlador Difuso aplicado a Hornos Industriales de Petróleo”. Tuvo como objetivo principal controlar y monitorear la corriente, temperatura y contaminación, que se produce dentro del prototipo experimental, mediante la implementación de un controlador difuso. La metodología que se desarrolló en esta investigación es de tipo cuantitativo, aplicativo y experimental; su estudio se desarrolló en la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, específicamente en el Laboratorio de Control y Automatización. Donde el método más efectivo para el control de parámetros físicos es el control difuso, el cual permite trabajar con parámetros muy complejos y no lineales, gracias a su alta flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión y su base en el lenguaje natural. Además proporciono un excelente rendimiento en condiciones de funcionamiento, Para el desarrollo del control difuso se utilizó un sistema de tipo Mamdani y Tsukamoto el cual se diseñó e implemento con la herramienta FuzzyLogicDesigner y/o Labview. Esta investigación aporta un sistema difuso que se puede adaptar a la amplia variedad de hornos industriales de la región, además da una solución con costos muy por debajo de las soluciones comerciales disponibles para su implementación. Los principales resultados alcanzados indican, que aplicando el control de Mandani con problema servo fue posible reducir la emisión de gases de combustión en un 77.00 PPM del CO y 0.00 PPM de CH<sub>4</sub>, a una temperatura de 200 °C en un tiempo de 40 Seg. Aplicando el control Mandani con problema regulado se logró reducir el CO en 27 PPM y CH<sub>4</sub> en 0 PPM en un tiempo de 75 Seg. Aplicando el control de Tsukamoto se logró reducir el monóxido de carbono en un 37.00 PPM a una temperatura de 130 °C en tu tiempo de 100 Seg.

**Palabras claves:** Control difuso, hornos industriales, automatización, CO, contaminación.



## ABSTRACT

This research project entitled, "Methodology for the Design of a Diffuse Controller applied to Industrial Petroleum Furnaces". Its main objective was to control and monitor the current, temperature and pollution, which is produced within the experimental prototype, through the implementation of a diffuse controller. The methodology that was developed in this research is quantitative, applicative and experimental; His study was developed in the Professional School of Electrical Mechanical Engineering, specifically in the Control and Automation Laboratory. Where the most effective method for the control of physical parameters is diffuse control, which allows working with very complex and non-linear parameters, thanks to its high flexibility, its tolerance for inaccuracy and its basis in natural language. In addition, I provide excellent performance in operating conditions. For the development of diffuse control, a Mamdani and Tsukamoto type system was used which was designed and implemented with the FuzzyLogicDesigner and / or Labview tool. This research provides a diffuse system that can be adapted to the wide variety of industrial furnaces in the region, and also provides a solution with costs well below the commercial solutions available for its implementation. The main results indicate that, by applying Mandani control with a servo problem, it was possible to reduce the emission of combustion gases by 77.00 PPM of CO and 0.00 PPM of CH<sub>4</sub>, at a temperature of 200 ° C in a time of 40 Sec. Applying the Mandani control with a regulated problem, CO was reduced by 27 PPM and CH<sub>4</sub> by 0 PPM in a time of 75 Sec. By applying the Tsukamoto control, carbon monoxide was reduced in 37.00 PPM at a temperature of 130 ° C in your time of 100 sec.

**Keywords:** Diffuse control, industrial ovens, automation, CO, pollution.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

En la industria actual es de gran importancia y de elevada aplicación los hornos industriales que son de combustión sólido, líquido, gaseoso o hornos eléctricos, principalmente los hornos industriales en primera instancia se controlan por medio de controladores convencionales, el cual puede ser útil cuando se desee manejar plantas cuyo entorno sea simple, pero a medida que el procesos aumenta su complejidad y su rango de acción, y sumando sus variables de entradas y salidas, aumenta también su complejidad y con esto se ven reducidas las posibilidades de usar un controlador convencional. Una forma de enfrentar este tipo de inconvenientes es mediante el uso de controles modernos o controladores no convencionales así como el controlador Difuso, Redes Neurales, Sistemas Expertos, etc. cuyo alcance solo se ve limitado por la experiencia del operador utilizada para crear ciertas direcciones de control.

Es por ello que fue necesario construir un prototipo experimental, para realizar las pruebas del Control Difuso y a través de este sistema controlar y monitorear la corriente, temperatura y contaminación, con el propósito de reducir y monitorear las emisiones contaminantes.

Seguidamente se describe brevemente el contenido del presente proyecto de investigación; en el Capítulo I se tiene la introducción, descripción y formulación del problema, justificación, objetivos e hipótesis del proyecto de investigación; en el Capítulo II se cuenta con los antecedentes de la investigación y el sustento teórico; en el Capítulo III se tiene la metodología de investigación, materiales experimentales, diseño del control difuso, procesamiento de datos experimentales; en el Capítulo IV se muestran los resultados experimentales que responde a nuestros objetivos generales, aplicando los métodos de inferencia difusa de Mandani y Tsukamoto; en el capítulo V se tienen las

conclusiones que responden a los objetivos generales, en el Capítulo VI se tienen las recomendaciones para implementar adecuadamente un controlador difuso y sus respectivas precauciones a considerar; en el Capítulo VII se tiene las referencias bibliográficas.

## 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, la contaminación ambiental en el Perú y el mundo es cada vez más crítico, debido a que las causas principales son las grandes emisiones de gases del efecto invernadero que se propagan al medio ambiente, donde estos gases derivan de diversas fuentes así como de procesos industriales, hornos, calderos, etc. Ello debido a que no cuentan con la automatización suficiente y adecuada, porque en su mayoría en la industria de hornos o calderos, son automatizados con controladores convencionales. Ya que este tipo de controladores tienen ciertas limitaciones y desventajas en su implementación debido a esto la emisión de gases de combustión no es controlada adecuadamente.

Aplicando el control no convencional así como el control Difuso, se pueden manipular múltiples variables de entradas y salidas, debido a ello el control Difuso nos permite el control de una manera más flexible y recomendable, porque no requiere conocer el modelo matemático de la planta tampoco requiere linealizarlo, pero si requiere conocer las funciones de membresía, el universo de discurso, términos lingüísticos, las reglas del control, métodos para la Fusificación y Defusificación, y finalmente nos permite aplicar un método de inferencia difusa de Mandani y Tsukamoto. Los cuales nos permiten realizar un adecuado monitoreo y control de la temperatura e emisiones contaminantes, de la misma manera controlar la corriente del actuador y otros parámetros propios de la industria de hornos industriales. Con el control difuso estos parámetros será relativamente menos complicado monitorearlos y controlarlos.

## 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La presente investigación tiene como objetivo controlar y monitorear la corriente, temperatura y contaminación, paralelamente monitorear el metano ( $\text{CH}_4$ ) emitido por el prototipo experimental, todos estos parámetros con la implementación de un controlador difuso aplicando los métodos de inferencia difusa de Mandani y Tsukamoto.

### 1.2.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cuál será la metodología de diseño de un controlador Difuso aplicado a hornos industriales de petróleo?

### 1.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICOS

1. ¿El material de fabricación del quemador cómo influirá, cuando se realice el calentamiento del prototipo experimental?
2. ¿Cuáles serán las variables lingüísticas, términos lingüísticos, funciones de membresía, reglas de control para manipular las variables corriente, temperatura y contaminación en el diseño del controlador difuso?
3. ¿De los métodos de inferencia Difusa Mandani y Tsukamoto, cuál de estas dos alternativas será la más apropiada para el control de las variables?

## 1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto de investigación titulado; “metodología para el diseño de un controlador Difuso aplicado a hornos industriales de petróleo” se justifica debido a la necesidad de un dispositivo automático que nos permita realizar el control y monitoreo de la temperatura,  $\text{CO}$  (Monóxido de Carbono) y  $\text{CH}_4$  (Metano), que se encuentran presentes en la combustión de hornos a petróleo, aplicando controladores difusos de tipo Mandani y Tsukamoto

Para lograr este propósito fue necesario implementar un sensor de temperatura PT – 100 y dos sensores de calidad de aire MQ – 6 y MQ – 9, en el prototipo experimental,

que a través de estos sensores podremos medir la temperatura y controlar los gases contaminantes que se producirá dentro de modulo experimental, finalmente con esta investigación se estaría contribuyendo profesionalmente a la solución de problemas de contaminación de hornos industriales, calderos, etc. con mayor criterio y capacidad investigativa y práctica.

## **1.4. OBJETIVOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Controlar la corriente, temperatura y la emisión de gases contaminantes (Monóxido de Carbono), paralelamente monitorear el metano ( $\text{CH}_4$ ) que produce la combustión de un horno a petróleo, mediante la implementación de un Controlador Difuso, aplicando los métodos de inferencia difusa de Mandani y Tsukamoto.

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Diseñar y construir el sistema de calentamiento para el horno prototipo experimental, mediante el uso de un quemador.
2. Diseñar un horno a nivel de prototipo para realizar las pruebas del control difuso y por intermedio controlar y monitorear la corriente, temperatura y la emisión de gases contaminantes (Monóxido de Carbono) que produce el prototipo.
3. Desarrollar un programa en Matlab y/o Labview aplicando el método de Inferencia Difusa de Mandani y Tsukamoto para el control de las variables lingüísticas.

## **1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL**

Mediante la utilización de un controlador Difuso e implementado en un horno prototipo experimental, será posible controlar y monitorear la corriente, temperatura y las

emisiones contaminantes (Monóxido de Carbono) que produce la combustión y como segunda instancia monitorear el CH<sub>4</sub> (Metano) que produce el prototipo experimental en el proceso de la quema del combustible.

### **1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**

1. Diseño del quemador, Sensor de temperatura, sensor de Monóxido de carbono, sensor de Metano, electroválvula modular, garantizan el funcionamiento óptimo del controlador Difuso.
2. Variables lingüísticas, términos lingüísticos, reglas del control, método de Fusificación y Defusificación, permiten a que la inferencia difusa de Mandani y Tsukamoto, puedan inferir adecuadamente.
3. Diseño del diagrama de bloques, usando el Software de Matlab y/o Labview, permiten que el control difuso sean los más apropiados y óptimo.



## CAPITULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Para la presente tesis de investigación, se citan investigaciones relacionadas a nuestro proyecto de investigación, realizados en diferentes universidades del Perú y Latinoamérica.

**Primer antecedente:**

(Valverde & Castro, 2001). Presentaron el “Diseño e Implementación de un Controlador Difuso para la Regulación de Temperatura en un Horno Eléctrico Resistivo” a un valor constante, en éste se describen las características del controlador difuso, diseñado e implementado con el objetivo de mantener un valor de temperatura constante dentro del ambiente de un horno eléctrico resistivo. Ello se logra controlando la potencia eléctrica aplicada al banco de resistencias del que se compone el horno eléctrico. El controlador difuso se implementó sobre una arquitectura de hardware basada en el microcontrolador M68HC11E9 en su modo expandido.

**Segundo antecedente:**

(Camargo Castro & Villamizar Rivera, 2008). En su investigación titulada: “Control de temperatura de un horno por medio de Lógica Difusa”. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico. Universidad Pontificia Bolivariana. Tuvo como objetivo principal: Diseñar e implementar el control de temperatura de un horno, utilizando como principio la Lógica Difusa, a través de una herramienta de software que permita un óptimo procesamiento de señales y una mejor interfaz con el usuario. Donde obtuvieron las siguientes conclusiones: En este trabajo se ha logrado el control de la variable temperatura del horno eléctrico, utilizando la herramienta PID control Tool-Kit de Labview para el desarrollo del controlador de lógica difusa y PID. Se ha concluido que

el controlador Fuzzy Logic para el control de temperatura del horno, presenta un mejor funcionamiento con dos variables de entrada, para este caso las variables Error y Set-Point. Ya que manejando el error como variable única de entrada, se presentan inconvenientes de sintonización para los diferentes rangos de temperatura. En cuanto al control PID se ha demostrado que presenta una buena precisión cuando es bien ajustado. Debido a su sencillez y facilidad de implementación, sigue siendo una buena alternativa en aplicaciones donde no sean tan crítico el tiempo de respuesta.

**Tercer antecedente:**

(Hernández Agudelo, 2007). En su investigación titulada: “Diseño y construcción de un sistema automático de control de temperatura para un horno industrial”. Tesis para optar al título de Ingeniero Electricista, Universidad Tecnológica de Pereira-Colombia. El proyecto presenta el diseño, construcción y montaje de un control automático de perfiles de temperatura en un horno eléctrico que se utiliza en la industria de productos alimenticios. El horno consta de seis zonas con una potencia instalada de 600 Kilovatios, alimentado por una tensión de 440 voltios, 60 Hertz, tres fases en conexión Delta. Utilizando el MICROCOMPUTADOR y técnicas de Programa Almacenado, se mantendrá en cada una de las zonas de calentamiento una temperatura seleccionada (Set - Point) constante e independiente del nivel de disturbios externos. Se llegaron a las conclusiones: Se implementó un sistema de Control Automático de Temperatura usando técnicas de calibración de sistemas multivariables. El consumo de energía eléctrica disminuyó en un 20%. El costo de fabricación disminuyó en un 35%. No es necesario calibrar tantos parámetros como en un sistema tradicional SISO (PID) donde se tendría que ajustar tres parámetros por zona. La eficiencia de la línea de producción se incrementó en un 150 % aproximadamente al pasar de 500 Kg. /h a 750 Kg. /h de producto horneado. La calidad del producto se mejoró sustancialmente al reducir el retrabado de producto por

rechazado de color oscuro en un 90%. Es muy importante señalar que la utilización de estas técnicas de calibración de sistemas desconocidos es de mucha utilidad cuando se trata de adaptar equipos costosos a circuitos de control y mando modernos; como es el caso de la gran mayoría de la maquinaria existente en las industrias de los países en vías de desarrollo.

**Cuarto antecedente:**

(Vilca Contreras & Vidarte Chicchón, 2010). En su investigación titulada: “Diseño e implementación de un sistema de control difuso de agua temperada de uso doméstico”. Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico. Pontificia Universidad Católica del Perú. Tiene como objetivo principal: Diseñar e implementar un sistema de control de temperatura del agua, utilizando resistencias eléctricas sometidas a un control difuso que permita la optimización, a nivel del usuario, del uso de agua caliente, reduciendo el consumo innecesario de energía y brindando la cantidad de agua necesaria al usuario. Del trabajo realizado en este documento de tesis se concluye lo siguiente: El empleo de un controlador difuso, con resistencias eléctricas, logró establecer el valor de la variable temperatura en un máximo de 12 segundos (en contraste a los 20 segundos que tardo en calentar el agua sin controlador), con lo cual se disminuyó el consumo de energía eléctrica en un 50 %, si el número de usuarios está entre 2 y 3, y en un 15 % si el número de usuarios está entre 3 y 5, en comparación a los calentadores de almacenamiento. Además, se consiguió como máximo desperdiciar 0.75 litros de agua al encender el calentador. El sistema implementado presentó otros beneficios a nivel del usuario, tales como disminuir el espacio, evitar la instalación de tuberías adicionales y ofrecer agua caliente ilimitada. Estos resultados se lograron al calentar el agua conforme va circulando, en contraste con calentarla dentro de un tanque, obteniendo así un sistema que se adapta al ritmo de uso del usuario. Cabe mencionar que la tarjeta de control ocupa un espacio de

11 x 11 cm<sup>2</sup>, el cual puede ser reducido si se usan componentes de montaje superficial, con lo cual se reduce más el espacio del calentador. El sistema puede operar en climas similares al de la ciudad de Lima, ya que el sensor y el controlador pueden trabajar en un rango de 0 a 50 °C, y las resistencias pueden calentar el agua de entrada en un máximo de 20 °C. En el caso de climas drásticos, como el de Puno, se deben cambiar las resistencias eléctricas por unas de mayor potencia para que se obtengan valores de temperatura adecuados para el usuario.

**Quinto antecedente:**

(Condori Chahuara & Serpa Quispe, 2017). En su tesis titulada: “Diseño del control de temperatura para un horno industrial, mediante la modulación de ancho de pulso usando un PLC de gama alta”. Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista. Universidad Nacional del Altiplano – Puno. Se planteó como objetivo: Controlar la temperatura de un HORNO INDUSTRIAL, mediante la modulación de ancho de pulso usando un PLC de gama alta. Y Tiene como hipótesis: Los factores tecnológicos en la modulación de ancho de pulso tienen una relación directa en el control óptimo de la temperatura del horno industrial. Se utiliza la metodología para modelar el proceso con la función de transferencia de primer orden en el dominio Laplace, con los siguientes pasos. Implementando el controlador PWM al modelo matemático obtenido de la función de transferencia de primer orden, simulación del proceso de control con el controlador, análisis de respuesta en el estado transitorio y estacionario. Se usa la modulación de ancho de pulso para realizar un control efectivo de la temperatura del horno industrial, el PLC tiene un rango muy variado de esquemas que nos permite controlar de forma eficiente el proceso de funcionamiento del horno industrial. Se llegaron a las siguientes conclusiones: Aplicando el PLC MODICON M241 TM241CE24R que tiene el bloque proporcional integral Derivativo (PID) y su ajuste

PWM que integra el controlador, logramos controlar la temperatura a un 1.8% de error del Set\_Point (punto de referencia). Se ha logrado sintonizar la relación de la modulación de ancho de pulso en el PLC MODICON M241 TM241CE24R, utilizando el periodo High y Low usando los parámetros de PID. Se ha logrado llegar a controlar la variable del proceso (temperatura), usando la modulación de ancho de pulso (PWM) de una manera estable controlando la temperatura a un 98.2%, eliminando el error de estado estacionario.

## **2.2. SUSTENTO TEÓRICO**

### **2.2.1. TEORÍA DE CONTROL**

Los controles automáticos tienen una intervención cada vez más importante en la vida diaria, desde los simples controles que hacen funcionar un tostador automático hasta los complicados sistemas de control necesarios en vehículos espaciales, en guiado de proyectiles, sistemas de pilotajes de aviones, etc. Además el control automático se ha convertido en parte importante e integral de los procesos de manufactura e industriales modernos. Por ejemplo el control automático resulta esencial en operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de procesos, maquinado manejo y armado de piezas mecánicas en las industrias de fabricación, entre muchas otras.

En la actualidad en las modernas fábricas e instalaciones industriales, se hace cada día más necesario de disponer de sistemas de control o de mando, que permitan mejorar y optimizar una gran cantidad de procesos, en donde la sola presencia del hombre es insuficiente para gobernarlos. La industria espacial y de la aviación, petroquímica, papelera, textil, del cemento, etc. son algunos ejemplos de lugares en donde se necesitan sistemas de control, cuya complejidad ha traído como consecuencia el desarrollo de técnicas dirigidas a su proyecto y construcción.

El control automático ha jugado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Como los avances en la teoría y práctica del control automático brindan los medios para lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, mejorar la calidad y abaratar los costos de producción, liberar de la complejidad de muchas rutinas de tareas manuales respectivas, etc. la mayoría de los ingenieros tienen contacto con los sistemas de control, aun cuando únicamente los usen, sin profundizar en su teoría.

Un ingeniero que trabaje con control debe estar familiarizado con las leyes físicas fundamentales que rigen estos componentes. Sin embargo, en muchos casos y principalmente entre los ingenieros, los fundamentos existen como conceptos aislados con muy pocos lazos de unión entre ellos. El estudio de los controles automáticos puede ser de gran ayuda para establecer lazos de unión entre los diferentes campos de estudio haciendo que los distintos conceptos se usen en un problema común de control.

El estudio de los controles automáticos es importante debido a que proporciona una comprensión básica de todos los sistemas dinámicos, así como una mejor apreciación y utilización de las leyes fundamentales de la naturaleza. (Perez Alberto, Perez Hidalgo, & Perez Berenguer, 2008)

### **2.2.2. DIVISIÓN DE CONTROLADORES.**

Las teorías de control que se utilizan habitualmente son las teorías de control convencional, donde en este tipo de controladores, destacan configuraciones básicas las de tipo Proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D). La combinación de éstas, permite generar nuevas configuraciones, con mejores propiedades, siendo las más usuales las de tipo Proporcional–Integral (PI), Proporcional–Derivativo (PD) y la más general Proporcional–Integral–Derivativo (PID), también es de mencionar el control moderno y las teorías de control no convencional como (redes neuronales, algoritmos genéticos, sistemas expertos y de planeamiento, control difuso, etc.).



### 2.2.2.1. CONTROL CONVENCIONAL

La tendencia de control moderna contrasta con la teoría de control convencional en que su formulación es aplicable a sistemas de múltiples-entradas, múltiples-salidas, que pueden ser lineales o no lineales, invariantes en el tiempo o variables en el tiempo, mientras que la teoría convencional sólo es aplicable a sistemas de una entrada-una salida invariantes en el tiempo. Además, la teoría de control moderna es esencialmente una aproximación en el dominio temporal, mientras que la teoría de control convencional es una aproximación en el dominio de la frecuencia compleja. (Ogata, 2010)

La teoría de control clásico o convencional diseña controladores basados en el análisis de frecuencias complejas. Para este tipo de controladores no se puede colocar el sistema en cualquier parte del control. Y dentro de los controladores clásicos tenemos los siguientes controladores y compensadores.

#### **Control PID**

Este tipo de control es sumamente elemental para resolver un problema de control, porque nos permite resolver cualquier problema de control (PID) básico y sencillo, y a su vez se subdivide en tres tipos.

- **Básico:** Es el que tiene la acción proporcional integral y derivativa, sobre la señal de error directamente.
- **PI-D:** Esta versión del controlador sirve para evitar los cambios bruscos en la señal de error o en la señal de referencia, donde la acción derivativa ya no va conectada en la señal de error, sino que, se conecta en la señal de retroalimentación, mientras tanto la acción proporcional e integral siguen conectadas a la señal de error, de ese modo se evita el cambio brusco de la acción derivativa.

- **I-PD:** con esta versión de control se evita en la señal de acción a controlar, no genere cambios bruscos, para evitar los cambios bruscos, la acción proporcional y derivativa se conectan a la señal de retroalimentación, la acción integral se conecta sobre el señal de error.
- **Compensador de adelanto:** Este tipo de compensador nos sirve para acelerar la convergencia hacia la posición deseada, es decir que tan rápido se puede mover el mecanismo a controlar, hacia la posición deseada.
- **Compensador de retardo:** Este tipo de compensadores reducen el error de estado estable, muchas veces los controladores tienen errores en estado estable, y si existe un pequeño error de estado, para compensar este error se utiliza un compensador de retardo para eliminar el error de estado.
- **Compensador de retardo-adelanto:** Este tipo de compensadores unen en uno solo los compensadores de retardo y de adelanto y aceleran la estabilidad, además reducen los errores de estado estable.
- **Compensador paralelo:** Este tipo de compensador sirve para controlar la señal de salida o de acción del controlador.

#### 2.2.2.2. CONTROL MODERNO

Esta teoría de control se basa en la retroalimentación de estado, y existen tres tipos, de técnicas para este tipo de control.

- **Retroalimentación de estado:** Se toma el estado del sistema o de la planta que se quiere controlar, donde cada uno de los estados se multiplica por una ganancia, enseguida las señales multiplicadas se las retroalimenta hacia la entrada. El trabajo de retroalimentación de estado es diseñar las ganancias de tal manera que se puede colocar los polos del sistema en cualquier parte del sistema de control.

- **Retroalimentación de estado con observadores:** Para este caso, si no se conoce el estado del sistema, se usan observadores para estimar parte del estado, y a si formar su retroalimentación de estado.
- **Regulador óptimo cuadrático:** Este tipo de control es una técnica de control óptimo donde se minimiza la función de costo, que suele ser el estado, multiplicado por las ganancias y la señal de referencia.

### 2.2.2.3. CONTROL NO CONVENCIONAL

La técnica de control no convencional, surgió de algo distinto a la teoría de control, surgieron de áreas cercanas a algoritmos genéticos, inteligencia artificial, etc. y a su vez son importaciones que hizo la teoría de control, que tratan de emular las estrategias del pensamiento humano, usando el procesamiento digital de los cuales las más principales son. (Zamora Gomes, 2015)

- Control difuso.
- Redes neuronales artificiales
- Algoritmos genéticos
- Sistemas expertos y planeamiento.

### 2.2.2.4. TÉRMINOS BÁSICO DE LA TEORÍA DE CONTROL

A continuación se define la terminología necesaria para la teoría de control automático. Estas definiciones están basadas, en parte, en las propuestas de normas de la IEEE. Las variaciones en las definiciones dadas a continuación respecto a las normalizadas obedecen a la necesidad de emplearlas en los temas de introducción general.

- **Planta:** se designará como planta a cualquier objeto físico que pueda ser controlado. Puede ser un equipo, quizás simplemente un juego de piezas de una máquina funcionando juntas, cuyo objetivo es realizar una operación

determinada. Ejemplos de plantas son: horno de calentamiento, reactor químico, etc.

- **Proceso:** se definirá como una operación o conjuntos de pasos con una secuencia determinada, que producen una serie de cambios graduales que llevan de un estado a otro, y que tienden a un determinado resultado final.
- **Sistema:** De forma científica podemos definirlo como un arreglo de componentes físicos conectados o relacionados de tal manera que formen una unidad completa o que puedan actuar como tal; en otras palabras: Un sistema es una combinación de componentes que actúan conjuntamente, con un determinado objetivo a cumplir. (Perez Alberto et al., 2008)
- **Control:** Sistema que de alguna manera se la añade a la planta, donde la diferencia entre la entrada y la salida (el error) disminuya. (CORDOVA MENDOZA, 2013)
- **Sistema de control:** es un arreglo de componentes físicos conectados de tal manera que el arreglo pueda comandar, dirigir o regular, asimismo o a otro sistema. Estos sistemas comandan dirigen o controlan dinámicamente.
- **Entrada de un sistema:** Es una variable del sistema elegida de tal manera que se la utiliza como excitación del mismo.
- **Salida de un sistema:** Es una variable del sistema elegida de tal modo que se la utiliza para analizar los efectos que produjo una excitación en la entrada del mismo.
- **Entrada de un sistema de control:** Es una variable del sistema controlado que se elige de modo tal que mediante su manipulación se logra que el sistema cumpla un objetivo determinado.

- **Salida de un sistema de control:** Es una variable del sistema controlado que se elige de modo tal que mediante su estudio se analiza si el sistema cumple o no con los objetivos propuestos.
- **Realimentación:** es una propiedad de los sistemas que permiten que la salida del sistema o cualquier variable del mismo sea comparada con la entrada al sistema o con cualquier componente del sistema, de tal manera que pueda establecerse la acción de control apropiada entre la entrada y la salida.
- **Realimentación positiva:** cuando ambas variables comparadas son de igual signo.
- **Realimentación negativa:** cuando ambas variables comparadas son de signo contrario. En control se usa y aplica la realimentación negativa. Un sistema realimentado negativamente modifica las propiedades y características del sistema sin realimentar.
  - Los rasgos más importantes que la realimentación negativa impone a un sistema son: Aumento de la exactitud.
  - Se reducen los efectos de no linealidad y distorsión.
  - Aumenta el ancho de banda del sistema.
  - Disminuye la ganancia del sistema.
  - El sistema tiende a ser menos estable.
- **Perturbaciones:** es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se la denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema. (Ogata, 2010)
- **Control de Realimentación:** es una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir las diferencias entre la salida y la entrada del

sistema, y lo hace sobre la base de esta diferencia, la cual se denomina señal de error. (Perez Alberto et al., 2008)

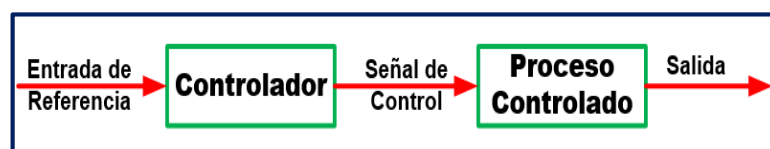
## 2.2.3. CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL

### 2.2.3.1. CONTROL EN LAZO ABIERTO

El sistema de control de lazo abierto, la salida no se mide tampoco se realimenta para compararla con la entrada de referencia. Los sistemas de control de lazo abierto son sistemas de control en donde la salida no tiene efecto sobre la señal o acción de control.

La Fig. Muestra la forma de cómo se implementa un sistema de control de este tipo.

**Figura 2.1:** Sistemas de control en lazo abierto.



Elaborado por el equipo de trabajo.

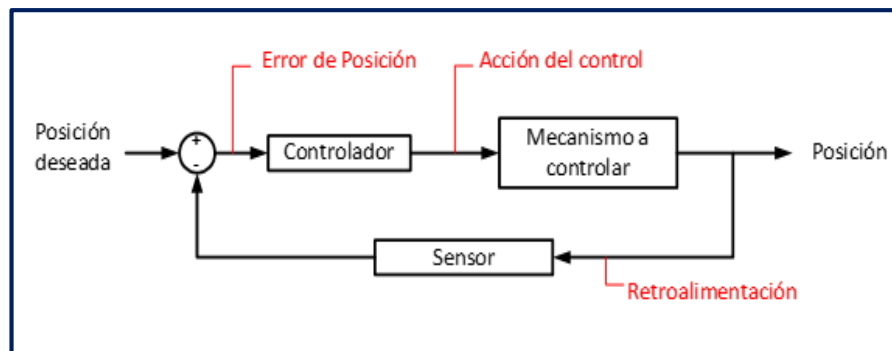
Los elementos de un sistema de control en lazo abierto, se pueden dividir en dos partes: el controlador, y el proceso controlado. La señal de entrada o comando se aplica al controlador, cuya salida actúa como una señal de control o señal actuante, la cual regula el proceso controlado, de tal forma que la variable de salida o variable controlada se desempeñe de acuerdo a ciertas especificaciones o estándares establecidos. En los casos simples, el controlador puede ser un amplificador, filtro, unión mecánica u otro elemento de control. En los casos más complejos puede ser una computadora tal como un microprocesador. (Perez Alberto et al., 2008)

### 2.2.3.2. CONTROL EN LAZO CERRADO

En los sistemas de control de lazo cerrado, la salida o señal controlada, debe ser realimentada y comparada con la entrada de referencia, y se debe enviar una señal actuante o acción de control, proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida a través del sistema, para disminuir el error y corregir la salida.

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control. Esto es, los sistemas de control de lazo cerrado son sistemas de control realimentados. La diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida se la denomina señal de error del sistema; esta señal es la que actúa sobre el sistema de modo de llevar la salida a un valor deseado. En otras palabras el término lazo cerrado implica el uso de acción de realimentación negativa para reducir el error del sistema. (Perez Alberto et al., 2008)

**Figura 2.2:** Sistema de Control de Lazo Cerrado



**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

- **Posición deseada:** es donde se instruye una serie de parámetros.
- **El mecanismo de control:** es la que contiene todo el sistema a controlar. Donde el mecanismo representa todo el modelo esquemático.
- **La posición:** es la señal de salida del control.
- **El sensor:** es generalmente el que detecta e informa la señal de salida y compara con la posición deseada, si existe algún error entre la posición deseada y la posición real entonces se activa el elemento mecánico y establece a la posición deseada.
- **El controlador:** es la que se encarga de medir el error, y decide a que mecanismo activar para corregir los errores. Donde el objetivo es compensar los errores.
- **Retroalimentación:** es la vía por el cual se informa la variable que se quiere controlar.

## 2.2.4. LÓGICA DIFUSA

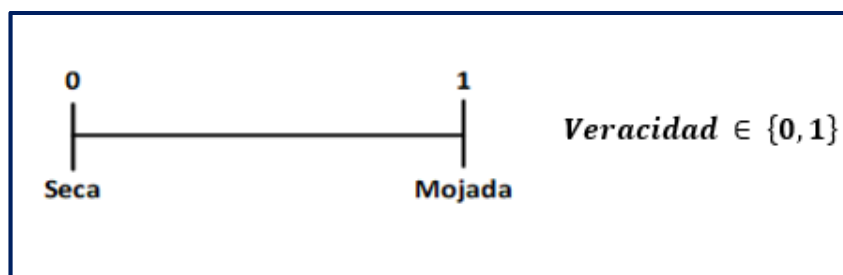
### 2.2.4.1. INTRODUCCIÓN A LA LÓGICA DIFUSA

La lógica Difusa es la lógica que usamos cotidianamente y es poco común que se le dé un formalismo matemático, esta lógica nos permite trabajar con alto grado de imprecisión y proporciona una manera simple y elegante de poder obtener una conclusión, además propone una cierta gama de posibilidades de veracidades parciales, donde pueden existir afirmaciones parcialmente verdaderas o parcialmente falsas entre sus extremos, que pueden tomar valores de veracidad entre [0.0 y 1.0].

**Ejemplo.** ¿Qué tan mojada se encuentra la ropa?

- Una respuesta sería a base de la lógica clásica, en donde solo existe la posibilidad de que la ropa este mojada o la ropa este seca.

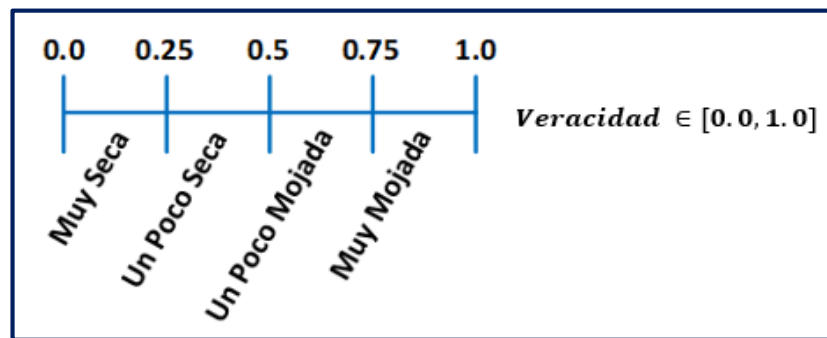
**Figura 2.3:** Valores de veracidad de lógica clásica



Elaborado por el equipo de trabajo.

- Pero si nos basamos en la lógica difusa, la ropa puede al menos tener cuatro estados a más, donde la ropa pueden estar muy seca, un poco seca, un poco mojada, y muy mojada, y podemos asignar que cuando la ropa está muy seca entonces, el valor de veracidad está entre 0.0 y 0.25, cuando está un poco seca entonces el valor de veracidad es 0.25 a 0.5 y así sucesivamente, entonces la lógica difusa permite tener valores de veracidades parciales entre los que serían en los dos extremos de ser completamente verdaderos o completamente falsos.



**Figura 2.4:** Valores de veracidad de la lógica difusa

Elaborado por el equipo de trabajo.

### 2.2.4.2. UTILIDAD DE LA LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa nos dice, quien tiene la maquinaria, y en donde se quiere controlar alguna variables especifica o conjunto de variables, se pueden diseñar controladores difusos basados en la experiencia humana, de algún operador con años de experiencia, entonces esto conlleva a la siguiente utilidad, que es trasladar la experiencia humana a una computadora y efectivamente la lógica difusa nos permite realizar esas acciones, entonces puede un ingeniero preguntarle de cuáles son las reglas mentales que usa para controlar la maquinaria, y sintetizar esas reglas en reglas lingüísticas que las comprenda una computadora, para diseñar un control difuso, que sustituya y remplace al operador, esta es una de las utilidades fundamentales, y la otra es la capacidad de procesar información con incertidumbre.

### 2.2.4.3. INVENTOR DE LA LÓGICA DIFUSA

El inventor de la lógica difusa fue el doctor Lofti A. Zadeh nació en año de 1921 en Baku, Azerbaijan, creció y estudio en Irán hasta obtener la licenciatura y obtuvo el grado de MS y PhD en Estados Unidos, actualmente es profesor de la universidad de Berkely desde 1959. (Zamora Gomes, 2015)

- En 1952 participo en la creación de la transformada Z, para el análisis y procesamiento de señales discretas en el tiempo.

- En 1964 propone la teoría de conjuntos difusos en un memorándum dentro de la universidad de Berkely.
- En 1965 publica el memorando, titulado Fuzzy sets.
- En 1974 publica sobre la teoría de la lógica difusa y el razonamiento aproximado.

### 2.2.5. CONJUNTOS DIFUSOS

Los conjuntos difusos son todos los conjuntos que pertenecen al universo de discurso en cierta medida y que no existe la exclusión de conjuntos. Y a su vez se agrega la función de pertenecía en un valor que va de [0 a 1], donde 1 (uno) quiere decir alta pertenencia y el 0 (cero) quiere decir que no pertenece al conjunto, donde un elemento de un conjunto puede pertenecer a más de una clase.

Matemáticamente un conjunto difuso se define por la siguiente expresión:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad \dots(2.1)$$

Donde:

A Variable lingüística de conjunto difuso.

x Elemento del conjunto difuso.

$\mu_A(x)$  Función de membresía o de pertenencia.

X Universo de discurso del conjunto difuso.

### 2.2.6. UNIVERSO DE DISCURSO

El universo de discurso se define como la totalidad de los elementos que conforma un conjunto cualesquiera, donde los elementos se pueden agrupar o clasificar del conjunto universo.

#### 2.2.6.1. NOTACIÓN DEL UNIVERSO DE DISCURSOS

**Continuos:** En el caso de conjuntos difusos continuos, se representa matemáticamente con la siguiente expresión.

$$A = \left\{ \int \frac{\mu(x)}{x} \right\} \quad \dots(2.2)$$

Donde:

A Conjunto difuso continuo.

$\mu(x)$  Función de membresía.

$x$  Elemento del conjunto difuso.

**Discretos:** En el caso de conjuntos discretos se representa matemáticamente con la siguiente ecuación.

$$A = \left\{ \sum \frac{\mu(x)}{x} \right\} \quad \dots(2.3)$$

Donde:

A Conjunto difuso discreto.

$\mu(x)$  Función de membresía.

$x$  Elemento del conjunto difuso.

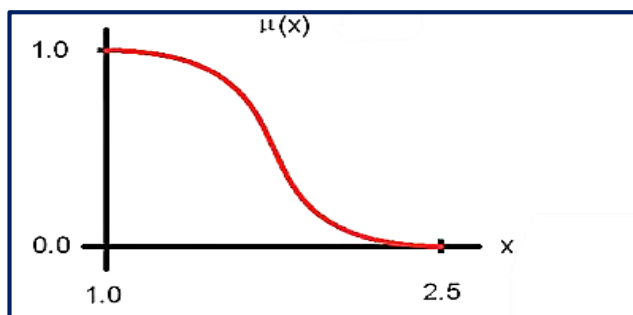
La línea que divide, entre la función de membresía y el elemento  $x$ , no es una división, para el universo continuo y discreto, significa que al elemento  $x$  le pertenece la función de membresía. El símbolo integral y sumatoria tampoco significa integración y suma total, significa que el conjunto está formado por todos los valores dentro de los corchetes. (Zamora Gomes, 2015)

### 2.2.7. FUNCIÓN DE MEMBRESÍA $\mu(x)$

La función de membresía es la medida de la pertenencia de un elemento al conjunto, donde el dominio siempre será el universo de discurso, la imagen de la función de membresía, siempre será un número real entre [0 y 1] y a su vez pueden ser decimales que van de [0.0 a 1.0]. Donde [0.0] significa que no hay pertenencia al conjunto y [1.0] quiere decir que hay mucha pertenencia o la totalidad de pertenencia al conjunto.

$$\text{Dominio} = \text{Universo de discurso}, x \in X \quad , \quad \text{Imagen} \rightarrow \mu \in [0,1]$$

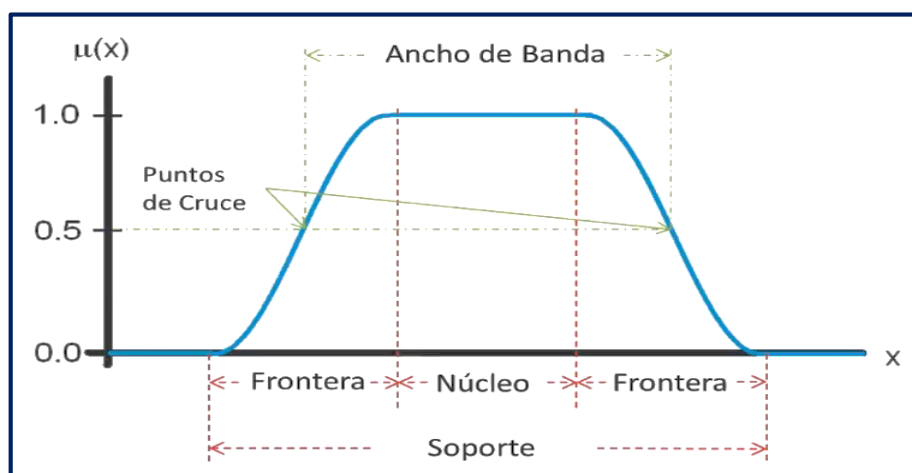
**Figura 2.5:** Función de Membresía  $\mu(x)$



**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

### 2.2.7.1. CARACTERÍSTICAS DE LA FUNCIÓN DE MEMBRESÍA

**Figura 2.6:** Características de la función de membresía



**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

**El núcleo:** El núcleo es el conjunto de valores en el universo de discurso, que tiene la membresía más alta e igual a la unidad.

$$Nucleo(A) = \{x | \mu_A(x) = 1\} \quad \dots(2.4)$$

**Fronteras:** Las fronteras son los elementos que se encuentran a la derecha o izquierda del núcleo del universo de discurso, pueden tomar valores de membresía de 0.0 y 1.0 pero nunca 1.0 y nunca 0.0.

$$Fronteras(A) = \{x | 0 < \mu_A(x) < 1\} \quad \dots(2.5)$$

**Soporte:** El soporte es cuando se une el núcleo con la frontera, que son todos los valores del universo de discurso, que tienen una membresía mayor a 0.

$$\text{Soporte}(A) = \{x | \mu_A(x) > 0\} \quad \dots(2.6)$$

**Puntos de cruce:** Se define como aquellos elementos que están dentro del universo de discurso que tienen una membresía igual a 0.5, y a la vez estos puntos sirven para identificar el ancho de banda de la función de membresía.

$$\text{Cruce}(A) = \{x | \mu_A(x) = 0.5\} \quad \dots(2.7)$$

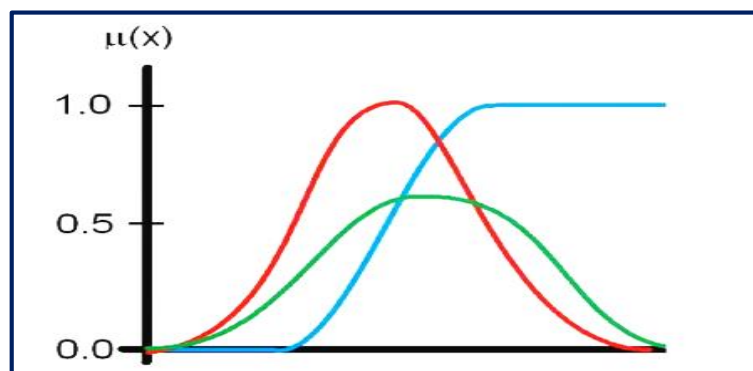
**Ancho de banda:** El ancho de banda es la diferencia, en valor absoluto entre los puntos de cruce.

$$\text{Ancho}(A) = |x_2 - x_1| \quad \dots(2.8)$$

### 2.2.7.2. TIPOS DE FUNCIONES DE MEMBRESÍA

#### Normal y subnormal

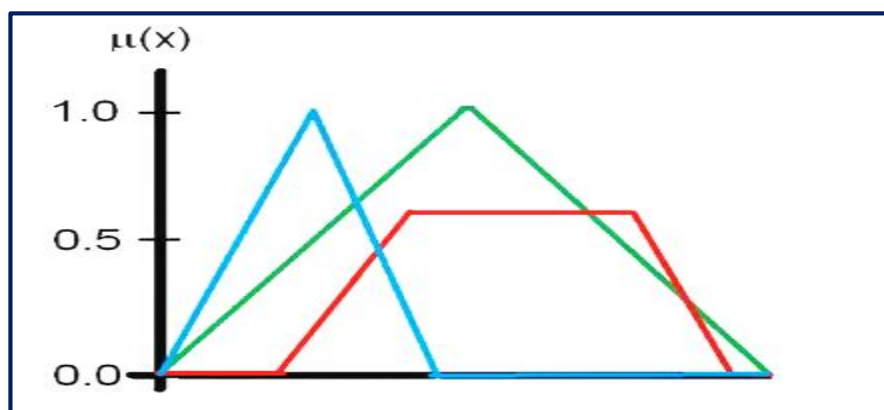
**Figura 2.7:** Función de membresía normal y subnormal



**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

En la imagen se tienen tres funciones de membresía donde:

- La función de color verde nunca alcanza el valor de 1, es decir que su núcleo es vacío, por lo que se le denomina como una función subnormal.
- La función de membresía de color rojo y azul siempre alcanzan el valor de 1.0, a lo que se le denomina como funciones normales.

**Simétrica y no simétrica****Figura 2.8:** Función de membresía simétricas y no simétricas

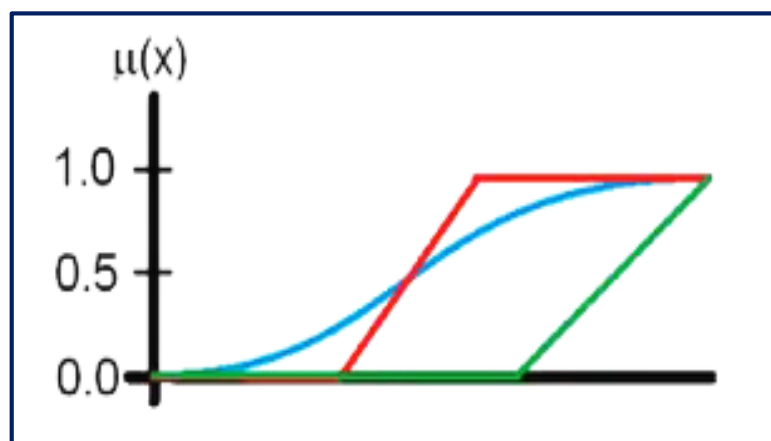
**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

De la imagen se tiene tres funciones de membresía donde:

- La curva de color verde es una función de membresía simétrica por que alrededor de su punto central encontramos la simetría.
- Mientras tanto la curva de color azul y rojo no son simétricas ya que no están bien centradas,

**Abiertas y cerradas.**

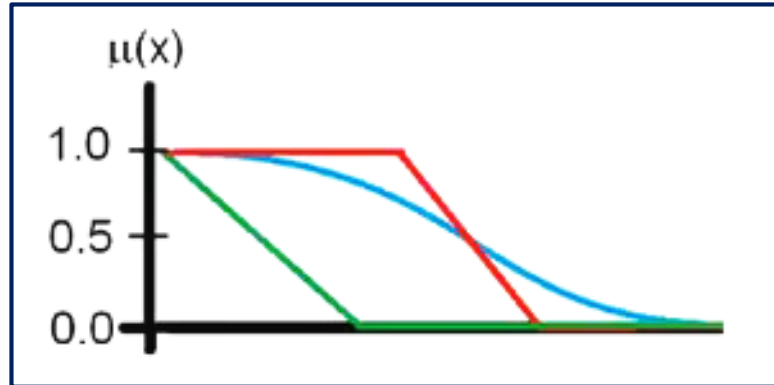
- **Abiertas por la derecha:** Se le dice así porque nunca baja el valor de membresía hacia cero.

**Figura 2.9:** Función de membresía abierta a la derecha

**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

- **Abiertas por la izquierda:** Se le dice así porque la función de membresía inicia en pertenencia 1 y termina en pertenencia 0.

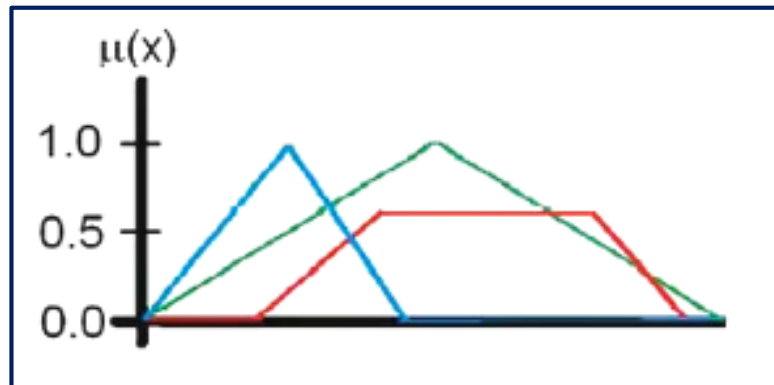
**Figura 2.10:** Función de membresía abierta a la izquierda



Fuente: (Zamora Gomes, 2015)

- **Cerrados.** Se le dice así porque la función de membresía toma valores de 0 a 1.

**Figura 2.11:** Función de membresía cerrada



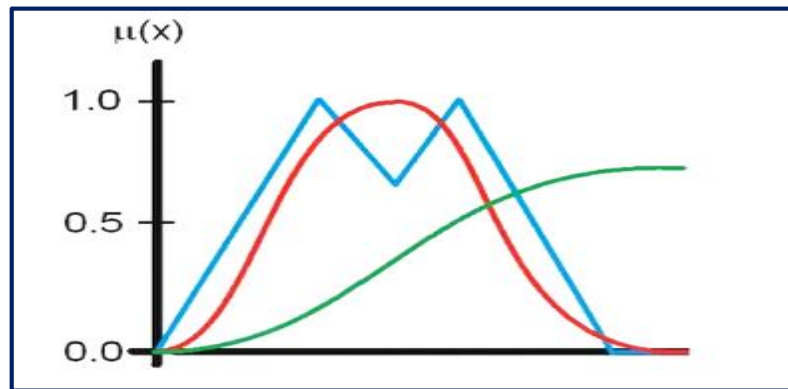
Fuente: (Zamora Gomes, 2015)

**Convexas y no convexas**

En la siguiente imagen se muestra tres funciones de membresía y la definición matemática para saber si la función es convexa o no, decimos es convexa si tomamos un segmento cualquiera de la función de membresía entre  $x_1$  y  $x_2$  y si la función de membresía no es menor a sus extremos, entonces la función es convexa.

$$\mu_A(x_1\lambda + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)) \quad \forall x_1, x_2 \in X, \quad \forall \lambda \in [0,1]$$

**Figura 2.12:** Función de membresía convexas y no convexas



Fuente: (Zamora Gomes, 2015)

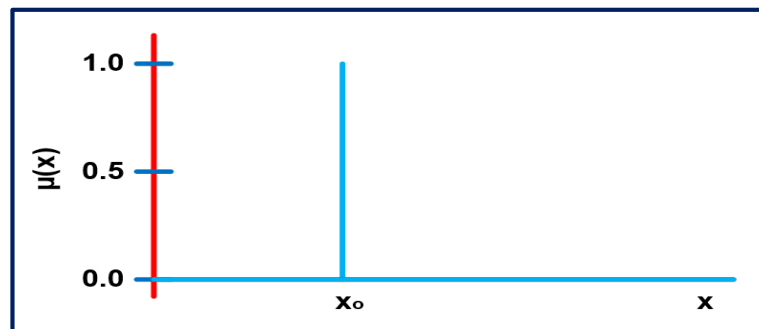
- Las funciones de membresía de color verde y rojo son convexas.
- La función de membresía de color azul no es convexa.

**2.2.7.3. FORMAS ESPECIALES DE LA FUNCIÓN DE MEMBRESÍA**

- **Singleton:** La función Singleton se define como aquella función que toma el valor de membresía igual a uno (1), para un único valor finito  $x_0$  y para todos los demás la función de membresía es cero (0), la función se puede usar para diseñar controladores difusos ya que a este tipo de controladores solamente lo pueden llegar valores discretos en algún momento del tiempo. La definición matemática es la siguiente.

$$\mu_A(x_0) = \begin{cases} 1 & x = x_0 \\ 0 & x \neq x_0 \end{cases} \quad \dots(2.9)$$

**Figura 2.13:** Función de Membresía Singleton



Elaborado por el equipo de trabajo.



- **Conjunto cortado:** El conjunto cortado es un conjunto certero, que es el resultado de cortar un conjunto difuso, en donde se define por la siguiente expresión matemática.

$$A_\alpha = \{x | \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad \dots(2.10)$$

Se dice que es cortado fuertemente por el signo mayor

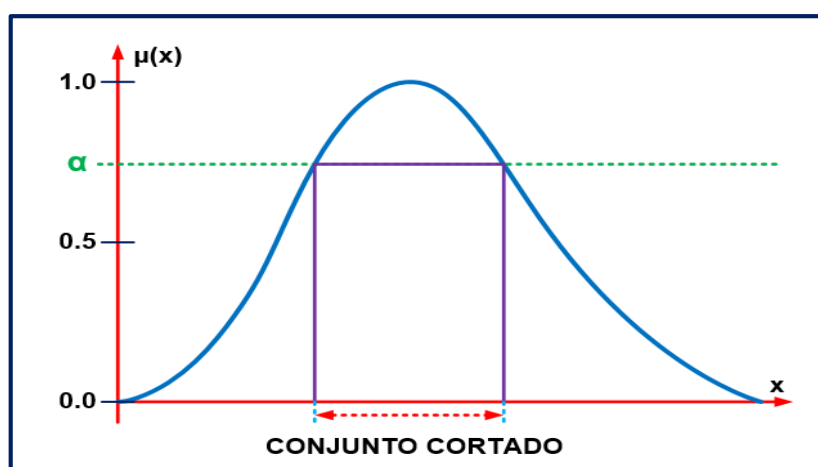
$$A'_\alpha = \{x | \mu_A(x) > \alpha\} \quad \dots(2.11)$$

Donde:

- $A_\alpha$  Conjunto cortado en alfa.
- $x$  Elemento del conjunto difuso.
- $\mu_A(x)$  Función de membresía.
- $\alpha$  Función de membresía limite.

Se tiene una función de membresía donde se tiene trazado un valor de alfa cualquiera, como se muestra en la imagen y donde corta la función de membresía, queda todos los elementos que se encuentran marcados con la flecha en color rojo, y esos valores son los elementos que corresponde al conjunto certero, y que provienen de un conjunto difuso.

**Figura 2.14:** Función de Membresía de Conjunto Cortado



Elaborado por el equipo de trabajo.

### 2.2.7.4. FUNCIONES DE MEMBRESÍAS TÍPICAS

Existen cinco funciones de membresías típicas, que suelen usarse generalmente para diseñar controladores difusos, las funciones que tienen derivadas discontinuas son las triangulares y las trapezoidales, las derivadas discontinuas sufre cambios con la pendiente abruptamente en algunos puntos del universo de discurso.

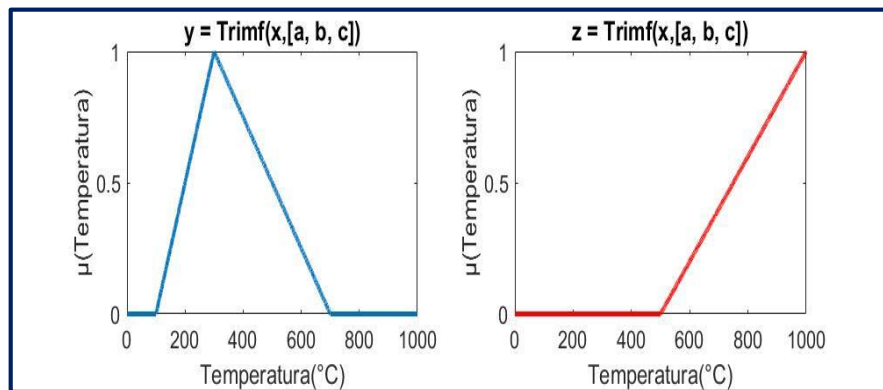
#### Derivadas Discontinuas Triangulares

La siguiente función matemática es para representar un triángulo.

$$f(x; a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{array} \right\} \quad a \leq b \leq c \quad \dots(2.12)$$

En donde se tiene tres parámetros a, b, c, la primera frontera que va subiendo la función ocurre entre a y b, y la segunda frontera donde baja, ocurre entre b y c, el núcleo de esta función es un solo elemento que está dado por b.

**Figura 2.15:** Función de Membresía Triangular



Elaborado por el equipo de trabajo.

- La primera en su forma cerrada.
- La segunda en su forma abierta a la derecha.

#### Derivadas Discontinuas Trapezoidales

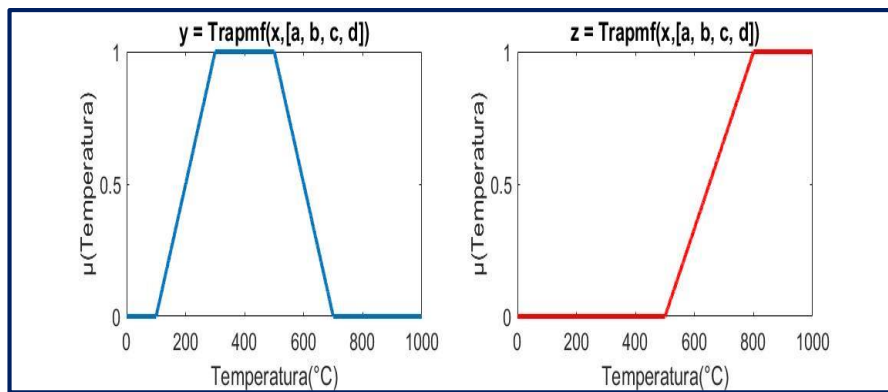
La función trapezoidal tiene un núcleo más amplio, donde se tiene cuatro parámetros a, b, c, d, la primera frontera entre a y b, representa el comienzo de la subida

de la función, después viene el núcleo entre b y c, y por último la frontera donde va bajando hacia 0 entre c y d.

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d - x}{d - c} & c \leq x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad a \leq b \leq c \leq d \quad \dots(2.13)$$

Enseguida se muestran dos figuras de función trapezoidal una en su forma cerrada y la otra en su forma abierta.

**Figura 2.16:** Función de membresía trapezoidal



Elaborado por el equipo de trabajo.

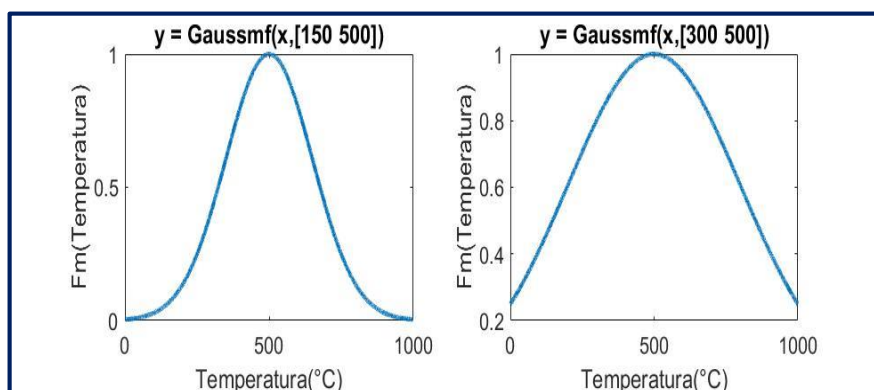
### Derivadas continuas cerradas simétricas Gaussiana

La función gaussiana asemeja a la función triangular con derivadas continuas y tienen como función matemática la siguiente expresión:

$$f(x; \sigma, x_0) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_0}{\sigma}\right)^2} \quad \dots(2.14)$$

Donde:

- $\sigma$       Determina el ancho de la campana.
- $x_0$      Fija el centro de la campana.

**Figura 2.17:** Función de membresía tipo gaussiana

Elaborado por el equipo de trabajo.

De la imagen:

- Al aumentar los valores de sigma la función se hace más ancha y al disminuir sigma la función se hace más delgada.
- Cambiando los valores de  $x_0$  en valores positivos y negativos la función se mueve hacia el lado derecho e izquierdo.

### Derivadas continuas cerradas simétricas Campana generalizada

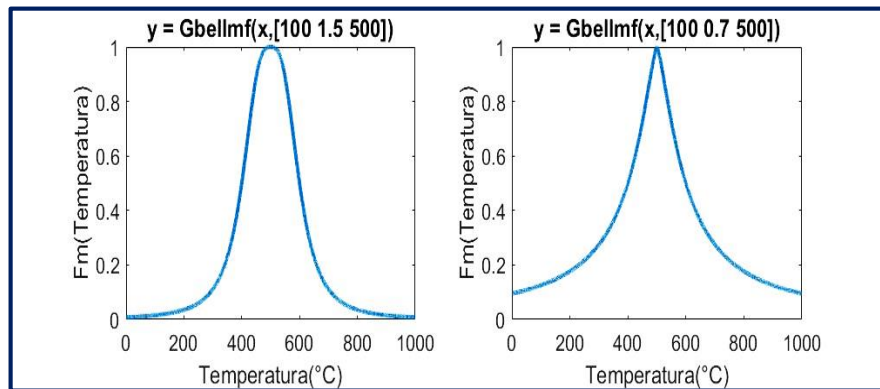
La campana generalizada se define por la siguiente función matemática.

$$f(x; a, b, x_0) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - x_0}{a} \right|^{2b}} \quad \dots(2.15)$$

Donde:

- $a$  Determina el ancho de la función.
- $b$  Determina la pendiente de la función.
- $x_0$  Fija el centro de la función.

**Figura 2.18:** Función campana generalizada



Elaborado por el equipo de trabajo.

De la imagen:

- Si se aumenta el valor de  $a$  la función se hace más ancha y viceversa y el núcleo se hace más grande.
- Al cambiar el valor de  $b$  se hace el cambio de la pendiente, y si el valor de  $b$  es pequeño entonces el núcleo se hace pequeño hasta llegar a un solo elemento y viceversa.
- Cambiando los valores de  $x_0$  a valores positivos, la función se mueve hacia el lado derecha e izquierda.

**Derivada continua abierta Sigmoidal**

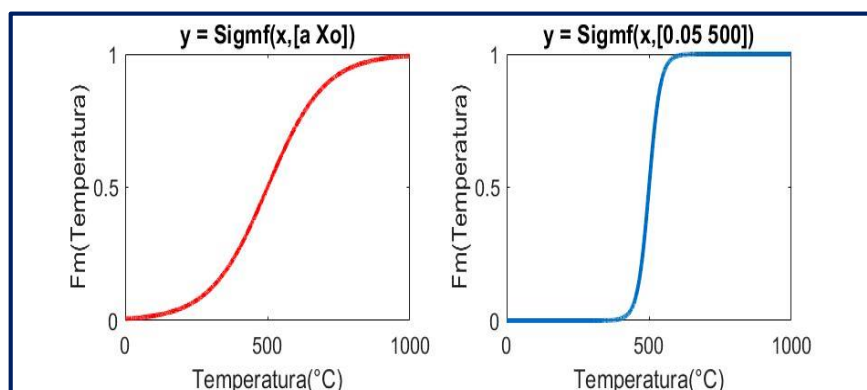
La función Sigmoidal está dado por siguiente expresión matemática:

$$f(x; a, x_0) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-x_0)}} \quad \dots(2.16)$$

Donde:

$a$         Determina la pendiente.

$x_0$       Fija el punto de cruce.

**Figura 2.19:** Grafico función Sigmoidal

Elaborado por el equipo de trabajo.

De la imagen:

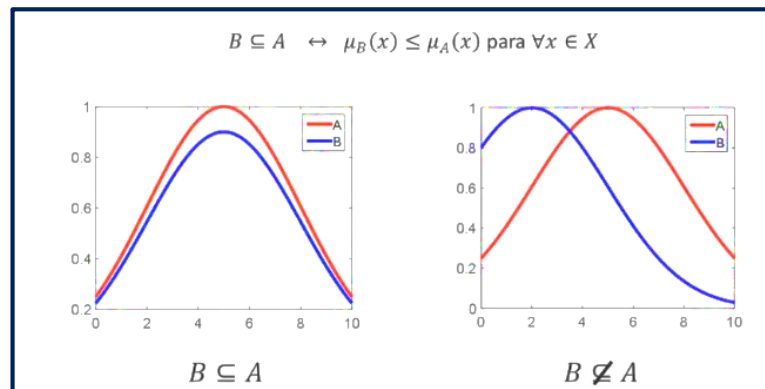
- Si  $a > 0$  abre a la derecha.
- Si  $a < 0$  abre a la izquierda.
- Si el parámetro de  $a$  es pequeño, entonces la transición se hace muy suave asemejando a una recta y que a la vez no alcanza los valores máximos y mínimos de 1 y 0, y si se aumenta el valor de la transición es bastante abrupta asemejando a una recta vertical alcanzando los valores máximos y mínimos de 1 y 0.
- Cambiando los valores de  $x_0$  a valores positivos la función se mueve hacia el lado derecho y viceversa.

## 2.2.8. OPERACIONES DE CONJUNTOS DIFUSOS

### 2.2.8.1. SUBCONJUNTO DIFUSO

Para los subconjuntos difusos generalmente se realizar algunas operaciones con respecto a la función de membresía, donde la función de membresía es la que caracteriza la pertenencia de los elementos a los conjuntos difusos. De acuerdo a esa condición se muestra el grafico en la imagen.

**Figura 2.20:** Grafico subconjunto difuso



**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

De la imagen:

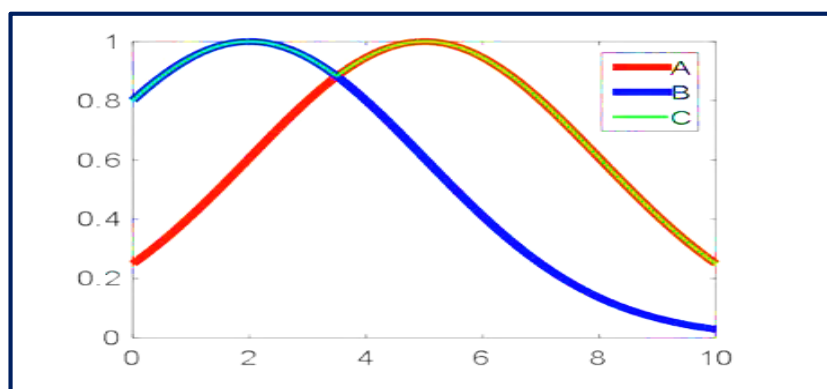
- El conjunto difuso B es subconjunto del conjunto difuso A si y solo si la función de membresía de B es menor o igual a la función de membresía de A para todos los posibles valores en el universo de discurso.
- los valores del conjunto B siempre está por debajo o toman valores menores de pertenecía de la función de membresía de A, por lo tanto el conjunto B es subconjunto de A.
- De la imagen a la derecha para ciertos valore del universo de discurso la función de membresía de B toma valores más grande, que la función de membresía de A.

### 2.2.8.2. UNIÓN DE CONJUNTO DIFUSO

La función de membresía toma valores entre 0 y 1, para ello Zadeh propuso realizar una operación de máx. Entre las dos funciones de membresía del conjunto A y del conjunto B y así generar la función de membresía del conjunto C, que matemáticamente se define y se gráfica de la siguiente forma.

$C = A \cup B$  si y solo si

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \text{ para } \forall x \in X$$

**Figura 2.21:** Grafico unión de conjuntos difusos

**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

De la imagen:

Las funciones de membresía de A y B, toman valores máximo, del mismo modo la función de membresía de C, Zadeh propuso esta operación de máximo para interpretar las funciones de membresía de unión de conjuntos difusos.

### 2.2.8.3. INTERSECCIÓN DE CONJUNTO DIFUSO

Para la intersección de conjuntos difusos se tiene que todos los elementos tienen cierta pertenencia a todos los conjuntos difusos, por lo tanto el problema es cómo saber que elementos comparten y que elementos no comparten, Zadeh propuso en 1965 una operación para las funciones de membresía de los conjuntos y así calcular una nueva función de membresía para el tercer conjunto, que es la intersección.

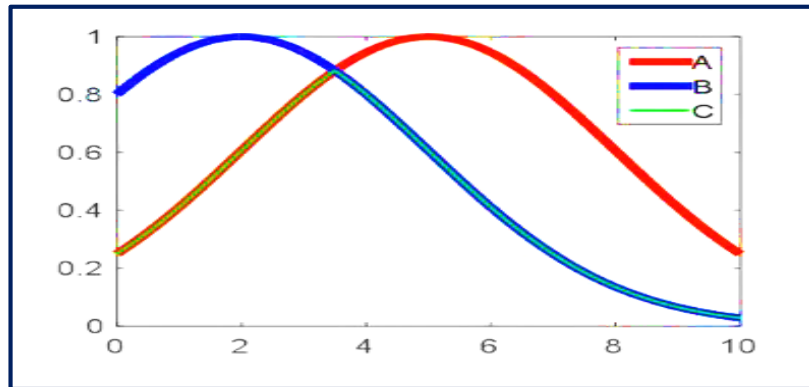
- En donde la función de membresía del tercer conjunto, es tomar el mínimo valor de la función de membresía de A y B, para todos los posibles valores del universo de discurso, donde matemáticamente se define:

$$C = A \cap B \text{ si y solo si}$$

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \text{ para } \forall x \in X$$



**Figura 2.22:** Intersección de conjuntos difusos



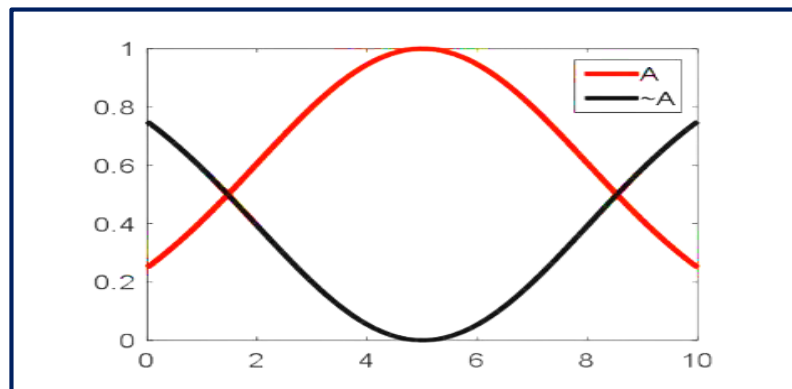
Fuente: (Zamora Gomes, 2015)

**2.2.8.4. COMPLEMENTO DEL CONJUNTO DIFUSO**

Zadeh propuso la ecuación del complemento difuso que es tomar la unidad y restárselo con la función de membresía del conjunto A, matemáticamente se representa por la siguiente expresión.

$$\bar{A} \longrightarrow \mu_{\sim A}(x) = 1 - \mu_A(x) \text{ para } \forall x \in X$$

**Figura 2.23:** Complemento de Conjunto Difuso



Fuente: (Zamora Gomes, 2015)

En donde si realizamos la suma de las dos funciones de membresía para todos los valores de X, el resultado siempre será la unidad.

La operación de complemento que propuso Zadeh tiene una justificación, donde la operación de complemento a la unidad también es válida para conjuntos certeros.

### 2.2.9. PROPIEDAD DE LAS OPERACIONES DIFUSAS

#### Propiedad conmutativa

La unión e intersección de dos conjuntos difusos es conmutativa y no importa en qué orden se comparen los valores de pertenencia.

**Tabla 2.1:** Propiedad conmutativa de conjuntos difusos

Propiedad conmutativa de conjuntos difusos		
Conjunto	Certero	Difuso
Unión	$A \cup B = B \cup A$	$\max(\mu_A, \mu_B) = \max(\mu_B, \mu_A)$
Intersección	$A \cap B = B \cap A$	$\min(\mu_A, \mu_B) = \min(\mu_B, \mu_A)$

Elaborado por el equipo de trabajo.

#### Propiedad asociativa

La propiedad asociativa de unión e intersección de tres conjuntos difusos es válido y aplicable a conjuntos difusos.

#### Unión

$$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C \quad \dots(2.17)$$

$$\max(\mu_A, \max(\mu_B, \mu_C)) = \max(\max(\mu_A, \mu_B), \mu_C) \quad \dots(2.18)$$

#### Intersección

$$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C \quad \dots(2.19)$$

$$\min(\mu_A, \min(\mu_B, \mu_C)) = \min(\min(\mu_A, \mu_B), \mu_C) \quad \dots(2.20)$$

#### Propiedad distributiva

La unión con respecto a la intersección es válida para conjuntos difusos.

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C) \quad \dots(2.21)$$

$$\max(\mu_A, \min(\mu_B, \mu_C)) = \max(\max(\mu_A, \mu_B), \max(\mu_A, \mu_C)) \quad \dots(2.22)$$

Si:

$$\mu_A \geq \mu_B \text{ y } \mu_A \geq \mu_C \rightarrow \mu_A = \mu_A \quad \dots(2.23)$$

$$\mu_A \leq \mu_B \text{ y } \mu_A \leq \mu_C \rightarrow \min(\mu_B, \mu_C) = \min(\mu_B, \mu_C) \quad \dots(2.24)$$

$$\mu_B \geq \mu_A \geq \mu_C \text{ o } \mu_C \geq \mu_A \geq \mu_B \rightarrow \mu_A = \mu_A \quad \dots(2.25)$$

La intersección con respecto a la unión es válida para conjuntos difusos.

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C) \quad \dots(2.26)$$

$$\min(\mu_A, \max(\mu_B, \mu_C)) = \max(\min(\mu_A, \mu_B), \min(\mu_A, \mu_C)) \quad \dots(2.27)$$

Si:

$$\mu_A \leq \mu_B \text{ y } \mu_A \leq \mu_C \rightarrow \mu_A = \mu_A \quad \dots(2.28)$$

$$\mu_A \geq \mu_B \text{ y } \mu_A \geq \mu_C \rightarrow \max(\mu_B, \mu_C) = \max(\mu_B, \mu_C) \quad \dots(2.29)$$

$$\mu_B \geq \mu_A \geq \mu_C \text{ o } \mu_C \geq \mu_A \geq \mu_B \rightarrow \mu_A = \mu_A \quad \dots(2.30)$$

### Propiedad de la identidad

Hay cuatro posibilidades de aplicar la propiedad de identidad que son validas para en conjunto difuso.

$$A \cup \emptyset = A \rightarrow \max(\mu_A, 0) = \mu_A \quad \dots(2.31)$$

$$A \cap \emptyset = \emptyset \rightarrow \min(\mu_A, 0) = 0 \quad \dots(2.32)$$

$$A \cap X = A \rightarrow \min(\mu_A, 1) = \mu_A \quad \dots(2.33)$$

### Propiedad Transitiva

Si:

$$A \subseteq B \text{ y } B \subseteq C \text{ entonces } A \subseteq C \quad \dots(2.34)$$

$$\mu_A \leq \mu_B \text{ y } \mu_B \leq \mu_C \text{ entonces } \mu_A \leq \mu_C \quad \dots(2.35)$$

### Propiedad Idempotencia

Si:

$$A \cup A = A \rightarrow \max(\mu_A, \mu_A) = \mu_A \quad \dots(2.36)$$

$$A \cap A = A \rightarrow \min(\mu_A, \mu_A) = \mu_A \quad \dots(2.37)$$

**Propiedad Involutiva**

Si:

$$\tilde{\tilde{A}} = A \quad \dots(2.38)$$

$$\mu_{\tilde{\tilde{A}}} = 1 - \mu_A = 1 - (1 - \mu_A) = \mu_A \quad \dots(2.39)$$

**2.2.10. OTRAS OPERACIONES DE RELACIONES DIFUSAS**

- **Relación difusa:** Las relaciones difusas toman valores intermedios de entre 0 y 1, a estas relaciones no los podemos llamar función difusa, razón por el cual tiene relación con varios números al mismo tiempo, donde esa condición no debe de cumplirse, la notación matemática se representa por la siguiente ecuación.

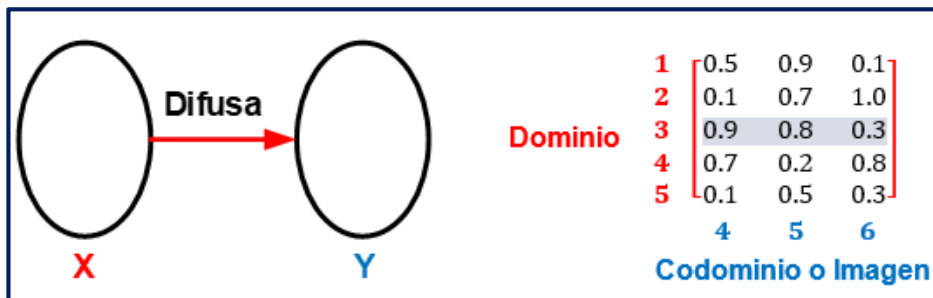
$$\mathcal{R} = \left\{ \frac{\mu_{\mathcal{R}}(x, y)}{(x, y)} \mid (x, y) \in X \times Y \right\} \quad \dots(2.40)$$

Donde:

$(x, y)$  Relación de pares de dos números.

$\mu_{\mathcal{R}}(x, y)$  Valor de membresía de la relación.

**Figura 2.24:** Relación Difusa



Elaborado por el equipo de trabajo.

**Operación para  $\mathcal{R}$**

Estas operaciones que se citan también se comportan como conjuntos difusos:

Unión, Intersección, Complemento y Subconjunto.

Las propiedades de las operaciones para  $\mathcal{R}$  también son las mismas que para los conjuntos difusos. Donde la propiedad de complementariedad no se cumple tanto para conjuntos difusos ni para relaciones difusas, pero si para las otras propiedades.

- **Producto cartesiano:** Los conjuntos difusos tienen un valor de membresía entre 0 y 1 y por lo tanto se necesita una definición para calcular el valor de membresía del producto cartesiano, Zadeh propuso que el valor de la función de membresía del producto cartesiano entre el conjunto A y B sea el mínimo entre el valor de membresías de A y B, donde el valor de membresía le corresponde al par (x, y)

$$\mu_{A \times B}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad \dots(2.41)$$

Ejemplo:

$$A = \left\{ \frac{0}{0} + \frac{0.1}{40} + \frac{0.5}{80} + \frac{0.8}{100} + \frac{1}{120} + \frac{1}{140} \right\} \quad B = \left\{ \frac{0.8}{1} + \frac{0.8}{2} + \frac{0.9}{3} + \frac{1.0}{4} \right\}$$

$$R = A \times B = \begin{matrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{40} \\ \mathbf{80} \\ \mathbf{100} \\ \mathbf{120} \\ \mathbf{140} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 \\ 0.8 & 0.8 & 0.9 & 1.0 \\ 0.8 & 0.8 & 0.9 & 1.0 \end{bmatrix}$$

**1**
**2**
**3**
**4**

- **Composición:** Se tiene tres conjuntos difusos X, Y, Z, y se tienen dos funciones, donde Y depende de X, Z depende de Y, donde esta relación de funciones difusas contienen valores de membresía para cada uno de los pares de números que relacionan. Matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = \bigvee_y [\mu_{R_1}(x, y) \wedge \mu_{R_2}(y, z)] = \max\{\min[\mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(y, z)]\}$$

$$R_1 = A \times B = \begin{bmatrix} 0.4 & 1 & 0.2 \\ 0.1 & 0 & 0.5 \\ 0.9 & 0.7 & 0.8 \end{bmatrix} \quad R_2 = B \times C = \begin{bmatrix} 1 & 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0 \\ 0.4 & 0.8 & 0.7 & 0.3 & 0.3 \\ 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$$

$$R_1 \circ R_2 = \begin{bmatrix} 0.4 & 1 & 0.2 \\ 0.1 & 0 & 0.5 \\ 0.9 & 0.7 & 0.8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0 \\ 0.4 & 0.8 & 0.7 & 0.3 & 0.3 \\ 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$$

Donde:

- La operación de multiplicación se cambia por un Min.
- La operación de suma se cambia por un Max.

El resultado de multiplicar las dos matrices nos da el siguiente resultado de composición difusa.

$$R_1 \circ R_2 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.8 & 0.7 & 0.4 & 0.3 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.2 & 0.5 \\ 0.9 & 0.8 & 0.7 & 0.4 & 0.8 \end{bmatrix}$$

## 2.2.11. OPERADORES DIFUSOS GENERALIZADOS

### 2.2.11.1. OPERADOR DIFUSO NORMA T

La norma T es una función, que puede realizar la intersección entre dos conjuntos difusos A y B: *funcion T*:  $[0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  Donde tiene como dominio el producto cartesiano de dos valores de membresía que van de 0 a 1 y cuya imagen de la función es otro valor de membresía de 0 a 1, esta norma T se puede representar a través de un operador binario  $\Delta$  como se muestra matemáticamente tal que.

$$\mu_{A \cap B}(x, y) = T(\mu_A(x), \mu_B(y)) = \mu_A(x) \Delta \mu_B(y) \quad \dots(2.42)$$

Para considerar una norma T es necesario que cumpla ciertas propiedades.

Acotada	$T(0, 0) = 0$ y $T(a, 1) = T(1, a) = a$
Monotónica	$T(a, b) \leq T(c, d)$ si $a \leq c$ y $b \leq d$
Conmutativa	$T(a, b) = T(b, a)$
Asociativa	$T(a, T(b, c)) = T(T(a, b), c)$

### 2.2.11.2. OPERADOR DIFUSO NORMA S

También conocidos como normas co-triangulares, son funciones que realizan la unión entre dos conjuntos difusos, si es una función tenemos un co-dominio:

$$\text{funcion } S: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$$

La norma S también lo podemos representar a través de un operador binario de símbolo  $\perp$  tal que la expresión matemática es:

$$\mu_{A \cup B}(x, y) = S(\mu_A(x), \mu_B(y)) = \mu_A(x) \perp \mu_B(y) \quad \dots(2.43)$$

La norma S debe de cumplir alguna particularidad.

Acotada  $S(1, 1) = 1$  y  $S(a, 0) = S(0, a) = a$

Monotónica  $S(a, b) \leq S(c, d)$  si  $a \leq c$  y  $b \leq d$

Conmutativa  $S(a, b) = S(b, a)$

Asociativa  $S(a, S(b, c)) = S(S(a, b), c)$

#### 2.2.11.2.1. COMPLEMENTO DIFUSO

El complemento de un conjunto difuso, puede generalizarse como una función N:  $N: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  El cual opera sobre un valor de membresía y genera otro valor de membresía, donde el dominio y la imagen de la función van de 0 a 1, y se representa por la siguiente expresión matemática:

$$\mu_{\sim A}(x) = N(\mu_A(x)) \quad \dots(2.44)$$

El complemento difuso debe de cumplir ciertas propiedades.

Acotada  $N(0) = 1$  y  $N(1) = 0$

Monotónica  $N(a) \geq N(b)$  si  $a \leq b$

Involutiva  $N(N(a)) = a$

### 2.2.12. RAZONAMIENTO DIFUSO

**Proposiciones clásicas:** son sentencias que pueden admitir proposiciones verdaderas [1] o falsas [0], para estimar los valores de verdad de expresiones lógicas.

**Tabla 2.2:** Razonamiento de proposiciones clásicas

<b>Proposiciones clásicas</b>						
Proposiciones		Conjunción	Disyunción	Negación	Implicación	Equivalencia
<b>p</b>	<b>q</b>	<b><math>p \wedge q</math></b>	<b><math>p \vee q</math></b>	<b><math>\sim p</math></b>	<b><math>p \rightarrow q</math></b>	<b><math>p \leftrightarrow q</math></b>
0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	1	0
1	0	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	1	1

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Proposiciones difusas:** es una sentencia cuya veracidad puede tomar valores intermedios de entre 0 y 1 incluido 0 y 1.

**Tabla 2.3:** Razonamiento de proposiciones difusas

<b>Proposiciones difusas</b>		
Proposiciones	Veracidad	Equivalente difuso
Conjunción	$V(p \wedge q)$	$\min(V(p), V(q))$
Disyunción	$V(p \vee q)$	$\max(V(p), V(q))$
Negación	$V(\bar{p})$	$1 - V(p)$
Implicación	$V(p \rightarrow q)$	$\max(1 - V(p), V(q))$
Equivalencia	$V(p \leftrightarrow q)$	$\max\{\min[V(p), V(q)], \min[1 - V(p), 1 - V(q)]\}$

Elaborado por el equipo de trabajo.

#### Variables lingüísticas

Una variable lingüística tiene cinco propiedades.  $(x, X, T(x), G, M)$

Donde:

- $x$  Es su nombre, toda variable lingüística debe de tener un nombre.
- $X$  Es el universo de discurso.



$T(x)$  Son los valores o términos lingüísticos que acepta la variable.

$G$  Es la regla sintáctica que genera los valores o términos lingüísticos.

$M$  Es la regla semántica que asocia cada término lingüístico con su significado. (Zamora Gomes, 2015)

### Reglas si entonces

Las reglas SI - ENTONCES son el núcleo de un controlador difuso y tienen una estructura de la forma:

*si  $x$  es  $A$ , entonces  $y$  es  $B$*

Donde:

$x, y$ : Son variables lingüísticos.

$A$  y  $B$ : Son valores o términos lingüísticos

La idea principal de las reglas SI – ENTONCES, es que un computador debe ser capaz de interpretar y procesar estas reglas, para concluir razonamientos difusos. Para ello existen dos posibles interpretaciones matemáticas una la relación difusa y la otra la implicación difusa:

- Relación Difusa  $R = A \times B$

- Implicación Difusa  $I = A \rightarrow B$

### Modus Ponens difuso

Un modus Ponens difuso se constituye por dos premisas, donde la primera premisa es un Hecho, y la segunda premisa es una Regla de tipo Si – Entonces, a partir de estas dos reglas se obtiene una Conclusión, que será el valor deseado, esquemáticamente se representa de la siguiente forma:

Premisa 1 (Hecho)	$x$ es $A'$	$A'$
Premisa 2 (Regla)	Si $x$ es $A$ , entonces $y$ es $B$	$R = A \times B$
Conclusión	$y$ es $B'$	$B' = A' \circ R$

Donde:

- La premisa 1 (Hecho), está represando por un conjunto difuso  $A'$ .
- La premisa 2 (Regla), está representado por un producto cartesiano.
- Para obtener la conclusión se hace la composición con la relación difusa y Hecho.

## **2.2.13. CONTROLADOR DIFUSO**

### **2.2.13.1. VENTAJAS DEL CONTROL DIFUSO**

Los controladores difusos no requieren conocer el modelo dinámico del sistema a controlar y a su vez facilita el diseño del controlador. Por lo tanto:

- No requiere identificar el sistema.
- No necesita aproximar el modelo.
- No necesita linializarlo.

### **2.2.13.2. DESVENTAJAS DEL CONTROL DIFUSO**

Es necesario conocer las reglas lingüísticas, son reglas SI - ENTONCES del control, donde estas reglas provienen de algún experto en control de ciertas maquinarias o de ciertos sistemas, y si no se tiene esas reglas, no podemos diseñar el control Difuso. Cuando no se tiene el modelo, se tiene dos alternativas para diseñar un control, usar un control PID o usar un Control Difuso.

### **2.2.13.3. APLICACIONES DEL CONTROL DIFUSO**

El control difuso ha tenido múltiples y diversas aplicaciones como son:

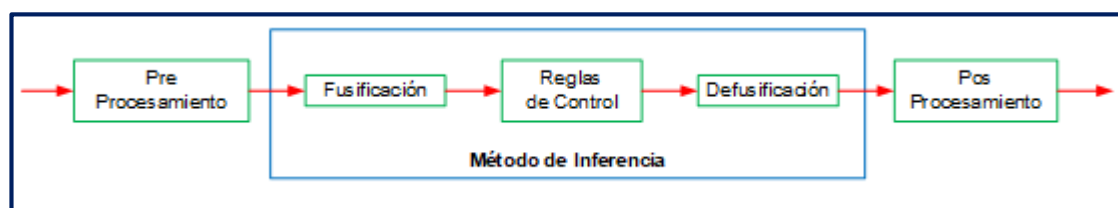
- Una de ellas ha sido el control de posicionamiento de las grúas pórticos que transportan carga. Y que sus variables a controlar fueron.
  - ✓ El posicionamiento de la grúa
  - ✓ Y el balaceo
- Otra aplicación que ha tenido el controlador difuso ha sido en las ciudades de Hamburgo y Mayhem en Alemania en donde existen plantas de incineración de basura, en donde el problema era estabilizar la generación de energía eléctrica,

debido a que la basura tiene un valor calórico muy cambiante, entonces la producción de electricidad también es muy variante.

- La otra aplicación, fue reducir las emisiones de gases tóxicos como el dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno.
- La otra aplicación de la lógica difusa, fue de la generación de energía eléctrica mediante el viento, en esta aplicación el problema que existe es el Angulo de ataque de las hélices junto con la intensidad del viento. El objetivo fue mantener en un valor óptimo el ángulo de ataque de las hélices con el fin de extender la vida útil y maximizar en la medida posible la generación de energía eléctrica.
- Control de dosificación en las plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Control de robots en inspección de túneles.
- Posicionamiento de prensas.
- Control de temperatura en máquinas de moldeo de plástico.
- Climatización y automatización de edificios.

#### 2.2.13.4. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL DIFUSO

**Figura 2.25:** Diagrama de bloques del control difuso



Elaborado por el equipo de trabajo.

#### 2.2.13.5. VARIABLES LINGÜÍSTICAS (VL)

Una variable lingüística acepta términos o valores lingüísticos específicos que se pueden definir, estos términos lingüísticos están asociados a conjuntos difusos en el universo de discurso que se define, para diseñar un controlador difuso primero se debe definir las variables de entradas y salidas.

**2.2.13.6. PRE PROCESAMIENTO**

Esta etapa acondiciona las señales que se introducen al procesador digital, donde el procesador digital puede ser una computadora o cualquier otro dispositivo, secuencial o paralelo que compute los datos. Donde las etapas necesarias para llegar a un controlador son, la filtración y la amplificación y muestrear las señales.

**2.2.13.7. REGLAS DEL CONTROL**

Las reglas de control son reglas lingüísticas, donde estas reglas definen como se debe de controlar el sistema, también estas reglas están definidas por la experiencia de algún operador o por la propia experiencia del quien está diseñando el controlador. Estas reglas combinan uno o más conjuntos difusos de entrada llamados antecedentes y salida llamado consecuentes. Que Involucran a conjuntos difusos y son afirmaciones de tipo SI-ENTONCES. Los conjuntos difusos de los antecedentes se asocian mediante operaciones lógicas AND, OR.

**2.2.13.8. MÉTODO DE INFERENCIA**

Este método es el algoritmo que guía a la computadora para inferir la conclusión, a partir de las señales que entran, que son las premisas y las reglas de control de tipo SI – ENTONCES.

Conjunto de reglas SI – ENTONCES	Interpretación Matemática
$x \text{ es } A'$	$A'$
$\text{si } x \text{ es } A_1, \text{ Entonces } y \text{ es } B_1$	$B'_1 = A' \circ R_1 = A' \circ (A_1 \times B_1)$
$\text{si } x \text{ es } A_2, \text{ Entonces } y \text{ es } B_2$	$B'_2 = A' \circ R_2 = A' \circ (A_2 \times B_2)$
$\vdots$	$\vdots$
$y \text{ es } B'$	$B' = B'_1 \cup B'_2 \cup \dots$

Donde:

- $x$  Es la entrada al controlador.
- $y$  Es salida del controlador.

$A_1, B_1$	Son los términos lingüísticos.
$A'$	Es el conjunto Singleton, que representa al error de entrada.
$B'$	Es la conclusión del Modus Ponens Difuso.
$B'_1$	Representa al primer conjunto resultante de las reglas de inferencia.
$R_1$	Representa la interpretación de la regla 1

### 2.2.13.9. FUSIFICACIÓN

Es un método por el cual se toma las magnitudes de las señales que entran y luego se convierten en cantidades difusas, específicamente es la evaluación de las magnitudes de las señales para cada uno de los conjuntos difusos, que hay en las premisas y las reglas de control.

### 2.2.13.10. DEFUSIFICACIÓN

Hace lo contrario de la Fusificación, es decir toma un conjunto Difuso y la convierte en una cantidad certera. De esta manera se genera una señal del control adecuada para modular o compensar los errores del sistema. Los métodos que existen son:

#### **Centroide**

El método del Centroide considera a la función de membresía del conjunto a defusificar del área total, en donde el centro de masa se expresa por la siguiente ecuación matemática.

$$y_0 = \frac{\sum y\mu(y)}{\sum \mu(y)} \quad \dots(2.45)$$

Donde:

$y_0$  Representa la salida del controlador difuso

#### **Bisectriz**

En este método la salida  $y_0$  busca dividir el área total, en dos partes iguales para activar o desactivar un mecanismo de cualquier naturaleza.

**Máximo central (MOM)**

Este método encuentra el intervalo de los valores de  $y$  para el cual se maximiza la función de membresía, una vez encontrado el intervalo, se calcula el  $y_0$  que es el promedio de los máximos del área total.

**Máximo más pequeño (SOM)**

Este método encuentra el valor  $y_0$  más pequeño del punto de cruce del área total de la función de membresía.

**Máximo más grande (LOM)**

Este método nos permite encontrar los valores máximo para el valor de  $y$  de la función de membresía, una vez ya encontrados los valores, se considera el valor máximo.

**2.2.13.11. POST - PROCESAMIENTO**

Sirve para filtrar la señal o para convertir la señal discreta en continua mediante un circuito retenedor, donde el retenedor puede ser de orden 0 o de orden 1, entonces es condicionar la señal para poder inyectar al actuador. (Zamora Gomes, 2015)

**2.2.13.12. MÉTODO DE INFERENCIA DE MANDANI**

Este método es la principal para la inferencia difusa se puede aplicar con una sola entradas o múltiples entradas, se ilustra cómo se muestra.

Conjunto de reglas SI – ENTONCES	Interpretación matemática	
$x$ es $A'$ y $y$ es $B'$	$R' = A' \times B'$	
si $x$ es $A_1$ y $y$ es $B_1$ , Entonces $z$ es $C_1$	$R_1 = A_1 \times B_1 \times C_1$	$C'_1 = R' \circ R_1$
si $x$ es $A_2$ y $y$ es $B_2$ , Entonces $z$ es $C_2$	$R_2 = A_2 \times B_2 \times C_2$	$C'_2 = R' \circ R_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$z$ es $C'$		$C' = C'_1 \cup C'_2 \cup \dots$

Generalizando tenemos:

$$\mu_{C'_i}(z) = V_{x,y}[\mu_{R'}(x, y) \wedge \mu_{Ri}(x, y, z)] \quad \dots(2.46)$$

Descomponiendo la relación difusa.

$$\mu_{C'_i}(z) = V_{x,y}[\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y) \wedge \mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(y) \wedge \mu_{C_i}(z)] \quad \dots(2.47)$$

Agrupando los valores de la funciones de membresía

$$\mu_{C'_i}(z) = \{V_x[\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A_i}(x)]\} \wedge \{V_y[\mu_{B'}(y) \wedge \mu_{B_i}(y)]\} \wedge \mu_{C_i}(z) \quad \dots(2.48)$$

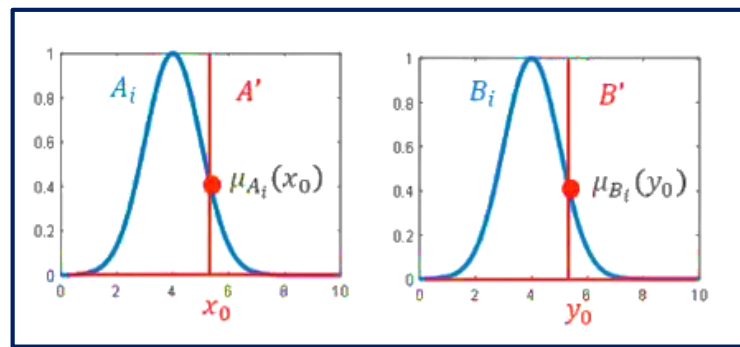
Donde:

$A'$  y  $B'$  Son conjunto Singleton de la forma.

$$A' = \{x_0\} \text{ y } B' = \{y_0\} \quad \dots(2.49)$$

Gráficamente se ilustra en la siguiente figura el valor de la Fusificación.

**Figura 2.26:** Fusificación del método de Mandani



**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

Resultado de los valores de Fusificación:

$$\mu_{A_i}(x_0) = V_x[\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A_i}(x)] \quad \dots(2.50)$$

$$\mu_{B_i}(y_0) = V_y[\mu_{B'}(y) \wedge \mu_{B_i}(y)] \quad \dots(2.51)$$

Por lo tanto el valor de membresía de:

$$\mu_{C'_i}(z) = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \wedge \mu_{C_i}(z) \quad \dots(2.52)$$

El resultado de las composiciones, queda expresado como se muestra.

$$\mu_{C'_1}(z) = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0) \wedge \mu_{C_1}(z)$$

$$\mu_{C'_2}(z) = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0) \wedge \mu_{C_2}(z)$$

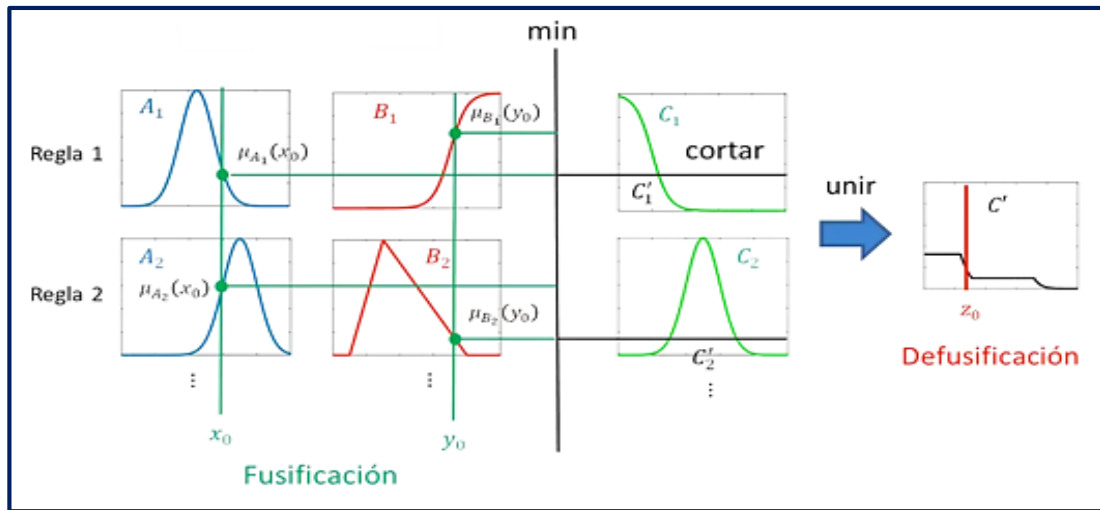
⋮

---


$$\mu_{Z'}(z) = \mu_{C'_1}(z) \vee \mu_{C'_2}(z) \dots$$

**Interpretación gráfica.**

**Figura 2.27:** Inferencia difusa de Mandani



**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

**2.2.13.12.1. MÉTODO DE INFERENCIA DE TSUKAMOTO**

Este tipo de controlador es la simplificación del controlador Mandani, en principio es mucha más sencillo procesar la información, y más sencillo diseñarlo. Por lo que deben de tener funciones de membresías abiertas.

Conjunto de reglas  
SI – ENTONCES

*x es A' y y es B'*

*si x es A<sub>1</sub> y y es B<sub>1</sub>, Entonces z es C<sub>1</sub>*

*si x es A<sub>2</sub> y y es B<sub>2</sub>, Entonces z es C<sub>2</sub>*

⋮ ⋮

---

*z es z<sub>0</sub>*

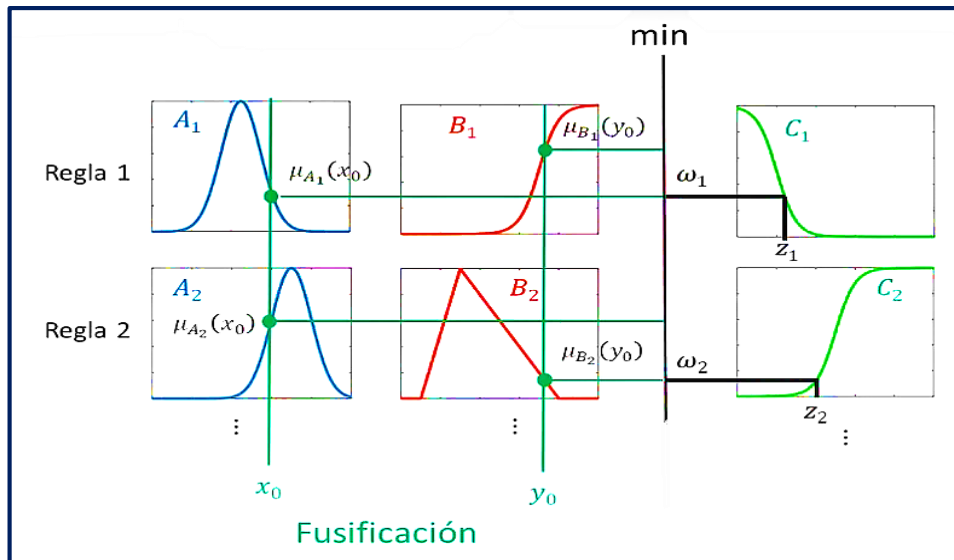
Donde:

$$z_0 = \frac{\omega_1 z_1 + \omega_2 z_2 + \dots}{\omega_1 + \omega_2 + \dots} \dots(2.53)$$



**Interpretación gráfica**

**Figura 2.28:** Inferencia difusa de Tsukamoto



**Fuente:** (Zamora Gomes, 2015)

**2.2.14. TEORÍA DE COMBUSTIÓN**

**2.2.14.1. INTRODUCCIÓN**

Los procesos de combustión tienen gran importancia y aplicación en motores de combustión interna, plantas de generación de vapor, hornos, etc.

El término combustión se refiere a una reacción química en la que interviene un combustible oxígeno o aire (oxidante), es importante que se considere la energía química liberada o absorbida y considerar el balance de materiales. (Paredes Pareja, 2010)

**2.2.14.2. COMBUSTIBLE**

Son sustancias que arden con facilidad en presencia de oxígeno, se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos.

**Combustible sólido**

Pueden ser de origen mineral (Carbón, Hulla, Antracita, Grafito, etc.) o de origen vegetal (Leña, Bagazo, Carbón de leña, Etc.).

### **Combustible líquido**

Son los derivados de hidrocarburos petróleo y sus derivados (Gasolina, Kerosene, Aceite, Combustible), con formula química de tipo  $C_xH_y$  donde los subíndices  $x$  y  $y$  poseen diversos valores. Los alcoholes también son combustibles líquidos con formula química  $C_xH_yO_3$ .

### **Combustible gaseoso.**

Los constituye el gas natural, incoloro, inodoro, que es una mezcla de diferentes gases en diferentes proporciones, siendo el metano  $CH_4$  su principal componente y en menor proporción el etano  $C_2H_6$ , propano, butano y otros gases (nitrógeno, dióxido de carbono) también están formados por gases artificiales obtenidos a partir de combustibles sólidos y líquidos.

### **2.2.14.3. COMBURENTE**

Es la sustancia que provoca la combustión o la activación, para que se realice la combustión se requiere de combustible, comburente y la temperatura necesaria para que inicie la combustión.

### **2.2.14.4. COMBUSTIÓN**

El proceso de la combustión implica la oxidación rápida de componentes en el combustible capaces de ser oxidados, acompañado de la transferencia de la energía química en energía molecular y de un aumento sustancial de la temperatura de las sustancias en la reacción.

Una reacción química durante el cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía, recibe el nombre de combustión.

### **2.2.14.5. COMPOSICIÓN DEL AIRE**

En la mayoría de los procesos de combustión, el oxígeno se suministra a través del aire ambiental.

En una base molar o de volumen, el aire seco está compuesto por 20,9% de Oxígeno y 78,1% de Nitrógeno, 0,9% de Argón y pequeñas cantidades de Dióxido de Carbono, Helio, Hidrogeno, Neón.

Para los cálculos de combustión empleando aire seco está constituido básicamente por 21% de Oxígeno y 79% de Nitrógeno, en volumen. Por tanto, en 100 moles de aire existe 21 moles de  $O_2$  y 79 moles de  $N_2$ .

Relación:

$$\frac{79}{21} = 3.76 \frac{\text{moles de } N_2}{\text{moles de } O_2} = 3.76 \frac{m^3 N_2}{m^3 O_2}$$

Se puede escribir también:

$$1 \text{ mol de } O_2 + 3.76 \text{ mol de } N_2 = 4.76 \text{ mol de aire}$$

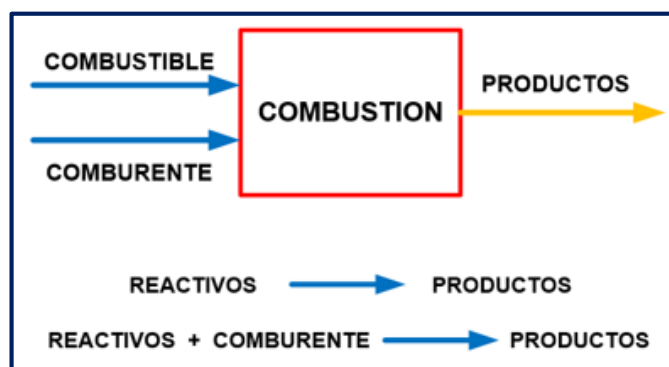
$$1 \text{ lb } O_2 + 3.32 \text{ lb } N_2 = 4.32 \text{ lb de aire}$$

$$1 \text{ kg } O_2 + 3.32 \text{ kg } N_2 = 4.32 \text{ kg de aire}$$

### 2.2.14.6. ECUACIÓN DE COMBUSTIBLE

Una reacción química se basa en el principio de conservación de la materia, en términos de conservación de átomos. Cuando tiene lugar una reacción química, los enlaces de las moléculas de los reactivos se rompen, los átomos y electrones se reagrupan para formar los productos.

**Figura 2.29:** Cámara de combustión



Elaborado por el equipo de trabajo.

La masa de los productos es igual a la de los reactivos, la masa total de cada elemento químico debe ser igual en ambos lados de la ecuación, aunque los elementos existan en compuestos químicos diferentes en reactivos y productos. Sin embargo en número de moles de los productos puede ser distinto del de los reactivos.

#### **2.2.14.7. COMBUSTIÓN COMPLETA**

La combustión completa implica que todo el carbono se transforma en Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), todo el Hidrogeno se transforma en agua (H<sub>2</sub>O) y todo el Azufre se convierte en Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>).

#### **2.2.14.8. COMBUSTIÓN INCOMPLETA**

En este caso los productos de la combustión contienen cualquier combustible o componente no quemado, como C, H<sub>2</sub>, CO u OH.

#### **2.2.14.9. AIRE ESTEQUIOMETRICO O TEÓRICO**

Es la cantidad mínima necesaria de aire para la combustión completa.

#### **2.2.14.10. COMBUSTIÓN ESTEQUIOMETRICO O TEÓRICO**

Es el proceso de combustión ideal durante el cual un combustible se quema por completo con aire teórico y en los productos de la combustión no hay oxígeno excedente. (Paredes Pareja, 2010)

#### **2.2.14.11. RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE**

Se define como la relación entre la masa del aire y la masa del combustible empleado en la combustión.

$$R_{a/c} = \frac{m_a}{m_c} \quad \dots(2.54)$$

#### **2.2.14.12. RELACIÓN COMBUSTIBLE AIRE**

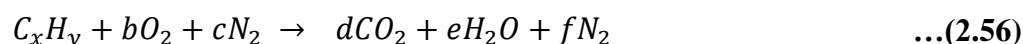
Se define como la relación entre la masa del combustible y la masa del aire utilizados en la combustión.

$$R_{c/a} = \frac{m_c}{m_a} = \frac{1}{R_{a/c}} \quad \dots(2.55)$$

### 2.2.14.13. COMBUSTIÓN IDEAL CON AIRE

Se considera que el H<sub>2</sub> se oxida hasta formar H<sub>2</sub>O, y el carbono (C) se oxida hasta formar Dióxido de Carbono CO<sub>2</sub>, si existiera Azufre se oxida hasta formar SO<sub>2</sub> (Dióxido de Azufre) puede reaccionar también hasta formar SO<sub>3</sub>, el cual en presencia del H<sub>2</sub>O líquido, dará ácido Sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Para el hidrocarburo de la forma C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> la ecuación de la reacción será de la forma.



#### 2.2.14.13.1. COMBUSTIÓN REAL

En los procesos reales, la combustión es incompleta cuando se emplea aire teórico o exceso de aire. El exceso de aire tiene la virtud que se forme la menor cantidad de CO en la combustión. (Paredes Pareja, 2010)

##### Factores que influyen en la combustión real

- Combustible
- Relación aire combustible.
- Geometría de la cámara de combustión.
- Temperatura de la combustión.
- Forma de alimentación del combustible.
- Turbulencia en la cámara.
- Velocidad de salida de los gases. (Paredes Pareja, 2010)

#### 2.2.14.13.2. COMBUSTIÓN IDEAL CON EXCESO DE AIRE

Para lograr la oxidación completa del combustible se requiere exceso de aire.

**Aire real (ar):** se define como la cantidad de aire que participa en el proceso de la combustión.

**Exceso de aire ( $e_x$ ):** se define como.

$$\% e_x = \frac{a_r - a_t}{a_t} \times 100 \quad \dots(2.57)$$

Porcentaje de aire teórico: se define como.

$$\% a_t = \frac{a_r}{a_t} \times 100 \quad \dots(2.58)$$

**Mescla rica:** Es la mescla con exceso de combustible o deficiencia de aire.

**Mescla pobre:** es la mescla con deficiencia de combustible o exceso de aire.

### **Combustión con deficiencia de aire**

La combustión con deficiencia de aire es incompleta, significa que no se oxida todo el combustible, entonces con los productos de la combustión aparecerá CO, cuya proporción está en función de la deficiencia de aire.

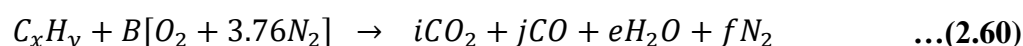
### **Combustión real con exceso de aire**

La combustión real con exceso de aire se define por la siguiente expresión.

### **Combustión real con deficiencia de aire**



La combustión real con deficiencia de aire se define por la siguiente expresión.



## **2.2.15. SENSOR DE TEMPERATURA**

Según (SRC, 1990) la temperatura es sin duda una de las variables más importantes a ser medidas en todo el proceso industrial. Y es la medida física más utilizada por los ingenieros y científicos en el mundo, y pueden ser medidos por una gran diversidad de sensores. Todos ellos toman la temperatura detectando algún cambio en una propiedad física. Los tipos de sensores en su mayoría pueden adoptar muchas formas en aplicaciones industriales y comerciales los más utilizados son:

**Figura 2.30:** Sensores de temperatura



**Fuente:** (SRC, 1990)

### 2.2.15.1. TERMOPARES

Son los más utilizados en los dispositivos de medición de temperatura. Al estar conectados en pares, son simples y eficientes que dan salida a un voltaje DC muy pequeño proporcional a la diferencia de temperaturas entre dos juntas en un circuito termoeléctrico cerrado. (SRC, 1990)

El funcionamiento de los termopares se basa en dos hilos metálicos de diferentes materiales unidos por un extremo, el cual se conoce como junta caliente o junta de medición. Cuenta con otro extremo separado, llamado junta fría. La diferencia de temperatura entre ambas juntas produce un diferencial de tensión, que será la señal enviada al dispositivo electrónico. Los más comunes son los siguientes.

**Tabla 2.4:** Tipos de sensores termopar

Tipos De Sensores Termopar	
Tipo	Descripción
<b>Tipo J:</b>	Hecho de aleación de cobre y níquel. De uso limitado en entornos oxidantes. Cuenta con un rango de temperatura entre los 0°C y los 750°C.
<b>Tipo T:</b>	Hecho de un alambre de cobre y otro de constatan. De uso recomendado en entornos de humedad. Rango de temperatura de -250°C y los 350°C.
<b>Tipo K:</b>	Compuesto de aleación de cromo y níquel y alomega, es el sistema de captación de temperatura más extendido. Su rango de temperatura es entre los -200°C y los 1250°C.

<b>Tipo E:</b>	Su combinación de materiales incluye chromega y constatan. Su rango de temperaturas se sitúa entre los -200°C y los 900°C.
<b>Tipo S:</b>	Este tipo de termopar se emplea para altas temperaturas de entre los -0°C y los 1650°C.
<b>tipo R:</b>	Esta variante de termopar opera entre temperaturas de 0°C y los 1750°C.

**Fuente:** (SRC, 1990)

### 2.2.15.2. RTD (Detector de temperatura resistiva)

Miden la temperatura mediante la correlación de la resistencia del elemento del RTD con la temperatura. La mayoría de los RTD consiste en un pedazo de alambre enrollado bien envuelto con un núcleo de cerámica o vidrio alrededor. Los RTD son inmunes al ruido eléctrico y adecuado para medir la temperatura en ambientes industriales, por ejemplo, alrededor de motores, generadores y equipos de alta tensión.

#### Tipos De RTDs

Los Detectores de temperatura resistiva pueden clasificarse en muchas variedades de acuerdo al tipo de metal de fabricación y su utilización es limitada.

**Tabla 2.5:** Tipos de sensores RTDs

<b>Tipos De Detectores De Temperatura Resistiva (RTDs)</b>			
<b>Metal</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Alfa</b>	<b>Comentarios</b>
Cobre (Cu)	-200°C a 260°C	0.00427	Bajo Coste
Molibdeno (Mo)	-200°C a 200°C	0.00300 0.00385	Bajo coste, alternativa al platino, rangos bajos de temperatura
Níquel (Ni)	-80°C a 260°C	0.00672	Bajo coste, rango limitado de temperatura
Níquel-Hierro (Ni-Fe)	-200°C a 200°C	0.00518	Bajo coste
Platino (Pt)	-240°C a 660°C	0.00385 0.00392 0.00377	Buena precisión. temperatura disponible hasta 1000°C

**Fuente:** (Encinas Pajares & Llobet Valero, 2011)



### 2.2.15.3. TERMISTORES

Usan electrodos internos que detectan el calor y lo miden a través de impulsos eléctricos. Dicho de otras palabras un termistor es un resistor sensible a la temperatura.

Existen dos tipos.

**Tabla 2.6:** Tipos de sensores termistores

<b>Tipos de termistores</b>	
<b>Termistor</b>	<b>Descripción</b>
<b>NTC</b> (coeficiente de temperatura negativa)	Un termistor NTC debe elegirse cuando es necesario un cambio continuo de la resistencia en una amplia gama de temperaturas. Ofrecen estabilidad mecánica, térmica y eléctrica, junto con un alto grado de sensibilidad.
<b>PTC</b> (coeficiente de temperatura positiva)	Deben elegirse cuando se requiere un cambio drástico en la resistencia a una temperatura específica o nivel de corriente.

Elaborado por el equipo de trabajo.

### 2.2.15.4. INFRARROJO

Los sensores de temperatura o sondas de temperatura por infrarrojos, son sensores para medida de temperatura sin contacto. Esto permite realizar medidas de temperatura con alta precisión para rangos amplios de temperatura. (Logicbus, 2001)

### 2.2.15.5. SENSOR DE TEMPERATURA PT-100

Según (Logicbus, 2001) el PT – 100 es un sensor de temperatura de tipo RTD, con un amplio rango de temperaturas, situadas entre los  $-200^{\circ}\text{C}$  y los  $850^{\circ}\text{C}$ . Su nombre hace referencia a los 100 ohms que muestra a los  $0^{\circ}\text{C}$ . Su resistencia aumenta a medida que aumenta la temperatura y su precisión dependerá del modelo que se monte (Din-B, Din-A, 1/3Din o 1/10Din).

### 2.2.16. SELECCIÓN DE UN SENSOR DE TEMPERATURA

Existen múltiples y variedades de sensores para diversas aplicaciones que pueden medir la temperatura. Para ello dependen de factores como; el rango de temperatura, precisión, velocidad de respuesta, etc.

Para elegir adecuadamente un sensor de temperatura es relativamente complicado. Para lograr una selección adecuada es realizar las pruebas y mediciones en la maquina o planta en donde está operando.

Relación de sensores tradicionales según el campo de aplicación.

**Tabla 2.7:** Sensores tradicionales según campo

<b>Relación De Sensores Tradicionales Según Campo</b>	
<b>Campo</b>	<b>Sensores Tradicionales</b>
Investigación Agrícola.	Termistor, Termopar Tipo T, Semiconductor
Automóvil, Procesos Químicos, Materiales Criogénicos	Termistor, pt100, Bimetálico Pt100, Termopar Resistencia de Óxido de Metal
Investigación Ambiental.	Termistor, Termopar Tipo T, pt100, Semiconductor
Industria General, Educación, Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado	Pt100 Semiconductor, Termistor, Termopar Tipo T, Pintura Ni1000, Termistor, pt100, pintura
En Productos Manufacturados	Semiconductor, Termistor, pt100
Metalúrgica	Termopar Tipo K o N

**Fuente:** (Encinas Pajares & Llobet Valero, 2011)

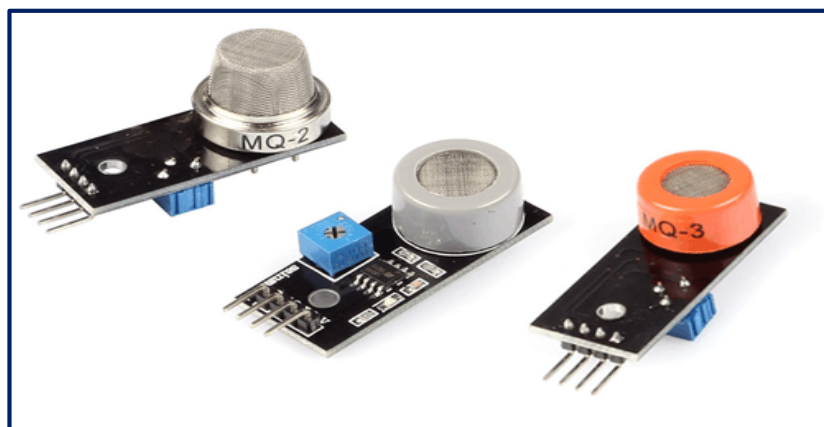
### 2.2.17. SENSOR DE DETECCIÓN DE CALIDAD DE AIRE

Los sensores MQ son una familia de dispositivos diseñados para detectar la presencia de distintos componentes químicos presentes en el aire. Podemos conectar estos dispositivos a un autómata o procesador como Arduino. Existe una gran variedad de sensores MQ. Cada modelo está diseñado para detectar una o más sustancias, pensadas

para un uso específico, como por ejemplo detección gases inflamables, calidad del aire o detección de alcohol en aire respirado.

Los sensores de gases deben ser calibrados antes de obtener una medida precisa. Aun calibrados estos sensores no disponen de la garantía necesaria para formar parte de un sistema de seguridad. (LLAMAS, 2019)

**Figura 2.31:** Sensores de tipo MQ



**Fuente:** (LLAMAS, 2019)

### **Funcionamiento De Un Sensor De Gas MQ**

Los sensores MQ están compuestos por un sensor electro-químico que varía su resistencia al estar en contacto con las sustancias.

Los sensores de gases son dispositivos con alta inercia, es decir, la respuesta necesita tiempos largos para estabilizarse tras un cambio de concentración de los gases medidos. Ello es debido a la necesidad física de que el gas abandone el material sensible, lo cual es un proceso lento. Todos los modelos MQ disponen de un calentador necesario para elevar la temperatura del sensor, sus materiales adquieran la sensibilidad. Mientras el calentador no alcance la temperatura de funcionamiento, la lectura del sensor no será fiable. El tiempo de calentamiento depende de cada modelo de sensor. En la mayoría de modelos es suficiente con unos pocos minutos pero algunos modelos requieren hasta 12 y 48 horas hasta obtener mediciones estables.

Por otro lado, cada modelo necesita su propia tensión para alimentar el calentador. En muchos modelos esta tensión es de 5V, pero algunos modelos tienen condicionantes especiales para la alimentación. El consumo de los sensores MQ puede ser elevado debido al calor necesario para funcionar el calentador, que puede llegar hasta 800 mW en algunos modelos. Esto es superior a la potencia que puede suministrar el regulador de Arduino, por lo que será necesario proporcionar una fuente de alimentación externa. (LLAMAS, 2019)

### Modelos de sensores MQ

**Tabla 2.8:** Modelo de sensores de calidad de aire

Modelo	Sustancias detectadas	Calentador
MQ-2	Metano, butano, GLP, humo	5V
MQ-3	Alcohol, Etanol, humo	5V
MQ-303A	Alcohol, etanol, humo	0.9V
MQ-4	Metano, gas natural comprimido (GNP)	5V
MQ-5	Gas natural, GLP	5V
MQ-6	Butano, GLP	5V
MQ-306A	Butano, GLP	0.9V
MQ-7	Monóxido de carbono	Alternado 5V y 1.4V
MQ-307A	Monóxido de carbono	Alternado 0.2 y 0.9V
MQ-8	Hidrógeno	5V
MQ-9	Monóxido de carbono, gases inflamables	Alternado 5V y 1.5V
MQ-309A	Monóxido de carbono, gases inflamables	Alternado 0.2 y 0.9V
MQ-131	Ozono	6V
MQ-135	Benceno, alcohol, humo, calidad del aire	5V
MQ-136	Ácido sulfhídrico	5V
MQ-137	Amoniaco	5V
MQ-138	Benceno, tolueno, alcohol, acetona, propano, formaldehido, hidrógeno	5V
MQ-214	Metano, gas natural	5V

MQ-216	Gas natural, gas carbón	6V
MG-811	Dióxido de carbono	6V
AQ-104	Calidad del aire *	
AQ-2	Gases inflamables, humo	
AQ-3	Alcohol, Benceno	
AQ-7	Monóxido de carbono	

**Fuente:** (LLAMAS, 2019)

### 2.2.18. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

Un controlador lógico programable es básicamente Un microcontrolador o una computadora industrial que se encarga de procesar los datos de una maquina industrial o de un grupo de máquinas, estos datos pueden provenir de diversas fuentes o entradas como se les llama, algunos tipos de entradas son, sensores, botones, temporizadores y cualquier otro señal que ingrese al PLC, después de recibir las entradas el controlador lógico ejecuta el programa precargado y envía las señales de salida correspondientes las cuales hacen actuar válvulas, pistones, lámparas, o asta motores eléctricos, Lo más importe de un PLC es que ya tiene incorporado relés en cada salida esto facilita el trabajo con corriente alterna. (Logicbus, 2001)

Un controlador lógico programable ayuda a reducir drásticamente el uso de relevadores de control industrial, nos permite automatizar procesos industriales y hacer el mundo un lugar mejor, el programa que se instala y se carga al controlador sustituye a la mayoría a los relevadores físicos, un PLC puede controlar cualquier sistema o maquina industrial, solamente se requiere de un programa para que lo indique al PLC lo que debe de hacer, el entorno de programación es fácil de realizar ya que se programa con diagrama de bloques, que en este caso es el lenguaje Ladder, o mejor denominado programa de escalera, que es la que se carga en la memoria del PLC. Lo principal de este dispositivo es que son muy confiables.

**Figura 2.32:** Autómatas programables

**Fuente:** (Jlim, 2013): [www.ctinmx.com](http://www.ctinmx.com)

### 2.2.18.1. Funcionamiento básico

- Detecta diversos tipos de señales del proceso mediante la Memoria Programable.
- Elabora y envía acciones de acuerdo al programa en la Memoria de Datos.
- Recibe configuraciones de los operadores y da reportes a los mismos.
- Admite modificaciones en el programa cuando son necesarias.

### 2.2.18.2. Principales aplicaciones

Ingeniería y producción en empresas, principalmente en la industria, en donde se aprovechan especialmente para los siguientes casos:

- Espacio reducido.
- Procesos de producción periódicamente cambiantes.
- Procesos secuenciales.
- Maquinaria de procesos variables.
- Instalaciones de procesos complejos y amplios.
- Chequeo de programación centralizada de las partes del proceso.

En concreto los PLC's son dispositivos que permiten automatizar y son empleados principalmente para procesos industriales, con múltiples ventajas y aplicaciones variadas.

(Jlim, 2013)

### 2.2.18.3. Ventajas y desventajas de los PLC

Los PLC pueden presentar muchas ventajas como también desventajas, principalmente se basa en factores como, al tipo de aplicación, al modelo de fabricación, ya que la industria de autómatas programables se encuentran múltiples y diversas tecnologías, esto hace que los controladores lógicos programables sean cada vez más complicados y robustos. (NEMA, 2017)

#### Ventajas De un PLC.

Menor tiempo de empleo en la elaboración de proyectos debido a que:

- No es necesario dibujar el esquema de contactos.
- No es necesario simplificar las ecuaciones lógicas ya que, por lo general, la capacidad de almacenamiento del módulo de memoria es lo suficientemente grande como para almacenarlas.
- La lista de materiales a emplear es más reducida y, al elaborar el presupuesto correspondiente, se elimina parte del problema que supone el contar con diferentes proveedores, distintos plazos de entrega, etc.
- Posibilidad de introducir modificaciones sin cambiar el cableado y añadir aparatos.
- Mínimo espacio de ocupación.
- Menor coste de mano de obra de la instalación.
- Economía de mantenimiento. Además de aumentar la fiabilidad del sistema, al eliminar contactos móviles, los mismos autómatas pueden detectar e indicar posibles averías.
- Posibilidad de gobernar varias máquinas con un mismo autómata.
- Menor tiempo para la puesta en funcionamiento del proceso al quedar reducido el tiempo de cableado.

- Si por alguna razón la maquina queda fuera de servicio, el autómatas sigue siendo útil para controlar otra máquina o sistema de producción. (Prieto, 2007)

### **Desventajas De Un PLC**

- Hace falta un programador, lo que exige la preparación de los técnicos en su etapa de formación.
- La inversión inicial es mayor que en el caso de los relés, aunque ello es relativo en función del proceso que se desea controlar. Dado que el PLC cubre de forma correcta un amplio espectro de necesidades, desde los sistemas lógicos cableados hasta el microprocesador, el diseñador debe conocer a fondo las prestaciones y limitaciones del PLC. Por tanto, aunque el coste inicial debe ser tenido en cuenta a la hora de decidirse por uno u otro sistema, conviene analizar todos los demás factores para asegurarnos una decisión acertada. (Prieto, 2007)

### **2.2.18.4. Partes Del Plc**

Un PLC se compone de varias partes, las más importantes son:

- La fuente de alimentación
- El CPU.
- Los módulos de entradas y salidas.
- El módulo de memoria.
- Fuente de alimentación: es la que proporciona la energía eléctrica adecuada al CPU y a las tarjetas del PLC.
- Unidad de procesamiento central o CPU: es la que se encarga de interpretar las entradas a través de las instrucciones que tiene programado el controlador y como resultado manipula las salidas del PLC.
- Los módulos de entrada y salida: son de lo más importante que existen en el PLC ya que a través de los módulos de entrada y salida es posible hacer una conexión



física entre el CPU y el sistema que se va a controlar, en los módulos de entrada se pueden conectar desde botones, sensores, mecanismos Switches. A través de estos módulos de entrada se le manda la retroalimentación al PLC, para que pueda este procesar los datos, los módulos de salida, el PLC recibe las señales provenientes del exterior, procesa los datos en base a su programa y envía una respuesta a los elementos y equipos para realizar funciones en el proceso como pueden ser; accionar bobinas de relevadores ya se para motores o mecanismos, válvulas proporcionales o también cerrar o abrir válvulas, también puede controlar lámpara de iluminación.

#### **2.2.18.5. Clasificación de los PLC's**

Los PLC pueden clasificarse según (Prieto, 2007), en función de sus características en:

##### **PLC Nano:**

Generalmente es un PLC de tipo compacto (es decir, que integra la fuente de alimentación, la CPU y las entradas y salidas) que puede manejar un conjunto reducido de entradas y salidas, generalmente en un número inferior a 100. Este PLC permite manejar entradas y salidas digitales y algunos módulos especiales.

##### **PLC Compacto**

Estos PLC tienen incorporada la fuente de alimentación, su CPU y los módulos de entrada y salida en un solo módulo principal y permiten manejar desde unas pocas entradas y salidas hasta varios cientos (alrededor de 500 entradas y salidas), su tamaño es superior a los PLC tipo Nano y soportan una gran variedad de módulos especiales, tales como:

- entradas y salidas análogas.
- módulos contadores rápidos.
- módulos de comunicaciones.

- interfaces de operador.
- expansiones de entrada y salida.

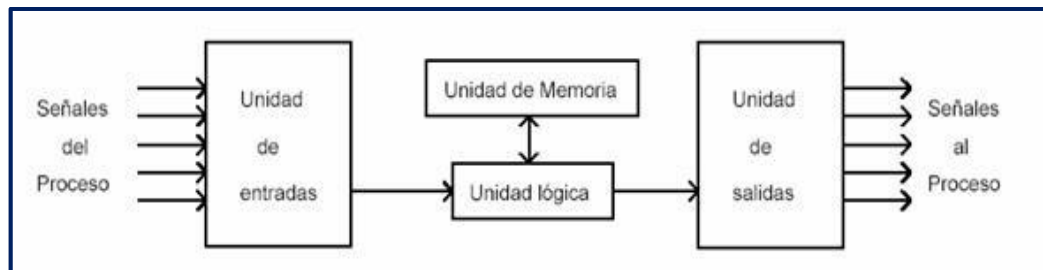
### PLC Modular

Estos PLC se componen de un conjunto de elementos que conforman el controlador final. Estos son:

- El Rack.
- La fuente de alimentación.
- La CPU.
- Los módulos de entrada y salida

De estos tipos de PLC existen desde los denominados Micro-PLC que soportan gran cantidad de entradas y salida, hasta los PLC de grandes prestaciones que permiten manejar miles de entradas y salidas.

**Figura 2.33:** Especificación de un micro PLC



**Fuente:** (Prieto, 2007)

## CAPITULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación titulada: “Metodología Para El Diseño De Un Controlador Difuso Aplicado A Hornos Industriales De Petróleo”. Emplea los siguientes métodos de investigación.

**Método cuantitativo:** debido a que nos permite examinar datos de manera numérica y analizar sobre variables cuantitativos en nuestro proyecto de investigación.

**Método experimental:** por que consiste en realizar la manipulación de variables experimentales para controlar la temperatura y las emisiones de gases de escape no comprobadas a través del uso de software Matlab y/o Labview y analizar su comportamiento experimental.

**Método Aplicativo:** se refiere al estudio de las variables activas y dinámicas, con el propósito de evaluar, monitorear y controlar, los efectos secundarios productos de la combustión y en caso de ser necesario calibrar la naturaleza del diseño y la intensidad de la intervención.

#### 3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

**Población:** Para el presente proyecto de investigación, se considera como población a investigar al prototipo experimental, que se encuentra conformado por un PLC logo siemens 6ED1, sensor de temperatura PT – 100, por dos sensores de calidad de aire MQ – 6 y MQ – 9 y un electroválvula modular CR - 02T.

**Muestra:** Nuestro proyecto de investigación se enfoca principalmente en controlar y monitorear la corriente, temperatura y las emisiones contaminantes, implementado en el módulo del controlador difuso. Para este fin se hace uso del software Matlab y/o Labview.

### 3.3. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN.

#### 3.3.1. Ubicación de la Población

**Tabla 3.1:** Ubicación de la población

Ubicación de la población					
Distrito	Provincia	Región	Altitud	Latitud	Longitud
Puno	Puno	Puno	3812 m.s.n.m	15°49'29"S	70°00'56"O

Elaborado por el equipo de trabajo.

#### 3.3.2. Descripción de la población

La presente investigación, de diseño de un controlador difuso aplicado a hornos industriales de petróleo, su ámbito de estudio y aplicación se desarrolló en el laboratorio de control y automatización de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, ubicado geográficamente en la Región Puno, a orillas del lago Titicaca. De la ciudad de Puno.

### 3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

Para el presente proyecto de investigación, se vio por conveniente utilizar las técnicas e instrumentos más optativos que a continuación se detalla en la siguiente tabla.

**Tabla 3.2:** Técnicas e instrumentos

Técnicas e instrumentos para recolección de datos	
Técnicas	Instrumentos
Observación directa	Modulo Horno experimental.
Diseño del control	Software Matlab, Labview.
Mediciones directas	Sensor de temperatura, sensores de calidad de aire
Equipos y Accesorios	PLC, compresora de aire, electroválvula.
Cálculos justificativos	Calculadora HP, Software Excel, Matlab.

Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.5. DESCRIPCIÓN DE MATERIALES EXPERIMENTALES

#### 3.5.1. PLC LOGO SIEMENS 6ED1

El PLC LOGO SIEMENS 6ED1 es un microcontrolador o un autómatas industrial que se encarga de procesar datos de una maquina industrial o de un grupo de máquinas, las entradas pueden ser de señales eléctricas analógicas o digitales, este tipo de dispositivos es más utilizado en la industria porque nos permite controlar varias entradas y salidas mediante la programación, donde las entradas pueden ser interruptores, pulsadores, temporizadores, sensores, relés o cualquier señal de esquema eléctrico, y las salidas pueden ser sensores, contactores, bobinas, relés o cualquier tipo de receptor eléctrico.

**Figura 3.1:** Plc Logo Siemens 6ED1

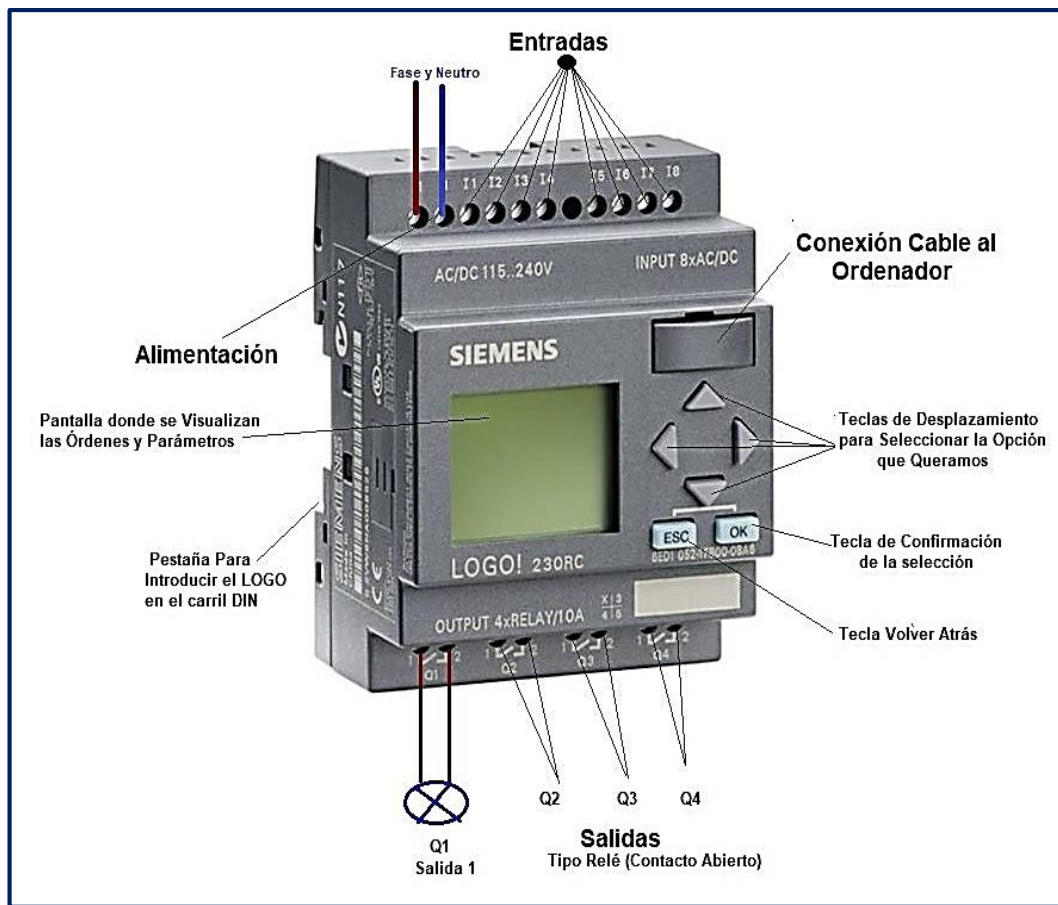


**Fuente:** (MasVoltage, 2018)

En su parte frontal se encuentran seis botones, los cuales facilitan la programación de manera sencilla, cuando no se tiene un programa diseñado, también permite visualizar el programa, estado de entradas y salidas mediante la pantalla LCD de forma gráfica. La otra manera de trabajar con el PLC LOGO 6ED1, es creando un programa en un computadora con el software LogoSoft, que se encuentra disponible en la página web de SIEMENS, para luego introducir el programa diseñado al PLC LOGO conectando con la computadora, mediante un cable de transferencia de datos.

**PARTES DEL PLC LOGO 6ED1**

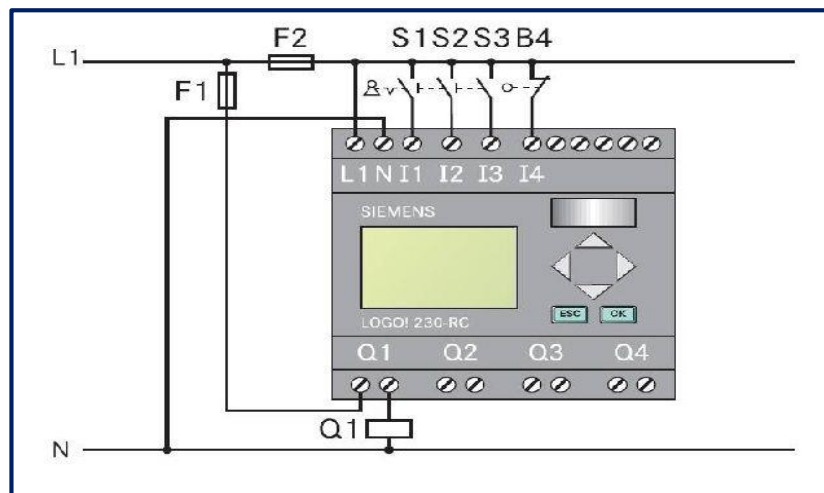
**Figura 3.2:** Partes del Plc Logo Siemens 6ED1



Fuente: (TECNOLOGIA, 2015)

**CONEXIONAMIENTO PLC LOGO ED61**

**Figura 3.3:** Conexión De Plc Logo Siemens



Fuente: (TECNOLOGIA, 2015)

### 3.5.2. MÓDULO DE EXPANSIÓN ANALÓGICA

El módulo de entrada analógica, es un dispositivo electrónico de recepción de tipo expansión analógica, que nos permite capturar las señales eléctricas, de entradas de la temperatura y contaminación, donde estas señales son enviadas al procesados PLC LOGO SIEMENS 6ED1.

El módulo de salida analógica es, un dispositivo electrónico de control de tipo expansión analógica, que nos permite la salida de señales eléctricas con la finalidad de accionar o poner en funcionamiento un dispositivo electrónico por intermedio del PLC LOGO 6ED1.

**Figura 3.4:** Módulo de entrada y salida analógica Logo 6ED1



Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.5.3. PULSADORES Y SEÑALIZADORES

Los pulsadores son dispositivos electro mecánicos robustos y compactos que permiten realizar maniobras para iniciar el encendido o apagado de un dispositivo electrónico a través de un pulso manual, que generalmente son de tipo NA (normalmente abierto) y NC (normalmente cerrado).

Las señalizaciones son indicadores luminosos de iluminación de tipo LED, que nos permite visualizar el estado del dispositivo que si estos están activos o inactivos.



**Figura 3.5:** Pulsadores y señalizadores

Fuente: (Cablematic, 2016)

**Descripción del producto**

- Diámetro: 22mm (Ø).
- Voltaje de aislación: 240V.
- Corriente térmica nominal: 15A.
- Vida útil eléctrica:  $\geq 100.000$  maniobras.
- Fabricados de acuerdo a la IEC/EN 60947-5-1.
- Fuente de luz: bloque LED fijo.

**3.5.4. TERMINALES TIPO PIN SOLIDO**

Los terminales son una serie de herramientas manuales que ofrecen conexiones confiables y aseguran una alta conductividad en instalaciones eléctricas. Están diseñados para proporcionar una fácil instalación confiable y duradera y son fabricados en anillo, en "U", en pin sólido, en terminales hembra o macho y empalmes tubulares aislados.

**Figura 3.6:** Terminales tipo pin solido

Fuente: (Industrial, 2012)



### 3.5.5. ELECTROVÁLVULA MODULAR CR - 02T

La electroválvula modular inteligente 02T es un actuador electromecánico el cual nos permite controlar el paso de fluidos compresibles y no compresibles así como al aire, agua, etc. Este dispositivo está compuesto por una pantalla LED de 1.3", que permite visualizar el Angulo de apertura de la válvula y el comando del control externo, además cuenta con tres botones de comando de control.

**Figura 3.7:** Electroválvula Modular 02T



**Fuente:** (TCrystal, 2019)

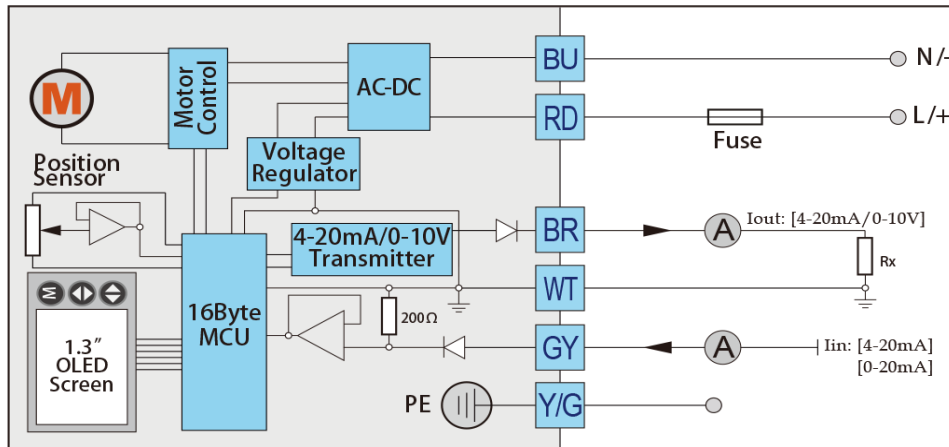
#### DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

- Válvulas adaptadas: válvula de bola de 2 vías y 3 vías y válvula de mariposa
- Voltaje Tensión nominal: AC / DC95V-265V, AC / DC24V
- Señal de control: 4-20mA, 0-20mA, 0-5V, 1-5V,0-10V, 2-10V
- Método de retroalimentación: 4-20mA
- Función especial: alta velocidad precisión de control:  $\pm 1\%$
- Salida de alarma: A (retroalimentación de contacto de relé)
- Motor sin escobillas de alto rendimiento, sobrecarga o sobrecalentado
- Se puede usar hasta 20000 veces
- La serie TCR es una carcasa exterior de plástico completo: ABS / PC + PET

**Diagrama de conexión**

**Figura 3.8:** Diagrama de conexión electroválvula modular

4-20mA/0-20mA

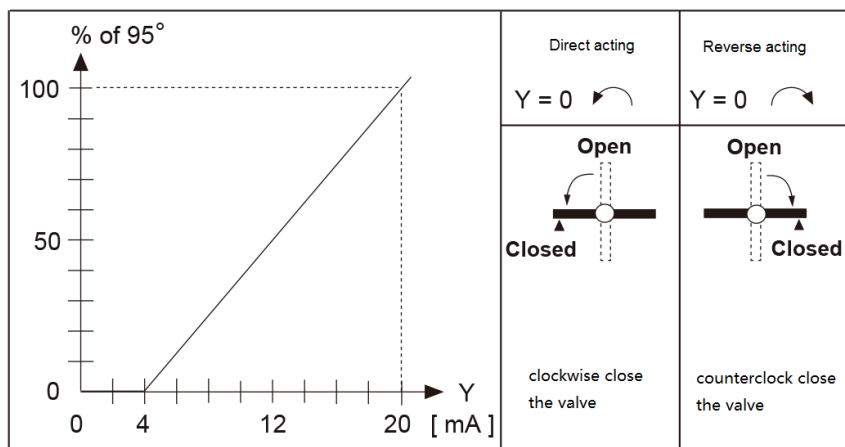


Fuente: (TCrystal, 2019)

**Ángulo De Rotación - Esquema De Señal De Control**

**Figura 3.9:** Grafico de ángulo de rotación electroválvula modular

rotate angle-control signal schematic



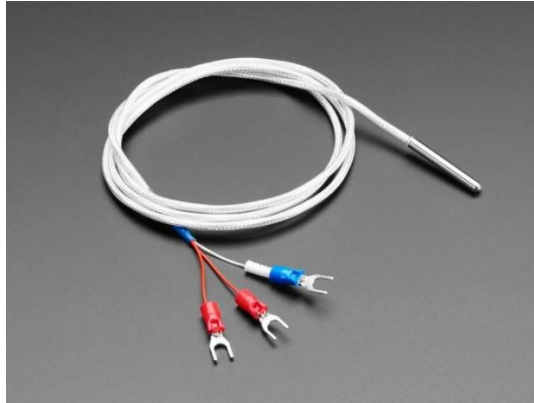
Fuente: (TCrystal, 2019)

**3.5.6. SENSOR DE TEMPERATURA PT-100 DIN-B**

El PT – 100 es un dispositivo que se basa en el principio de variación de la resistencia a medida que la temperatura cambia, este sensor presenta 100 ohms a cero grados centígrados, la capacidad de medición es de -14 a 200 °C. La forma más sencilla de utilizar este dispositivo es hacer pasar una corriente continua sobre la sonda,

provocando una caída de tensión. Los metales más utilizados para este elemento son el platino, cobre, níquel y níquel hierro.

**Figura 3.10:** Tensor de Temperatura PT - 100



**Fuente:** (Electronilab, 2019)

### Características

- 1) Basado en principios de medición de resistencia.
- 2) El material de la resistencia es platino con un valor de 1000 ohmios a la temperatura de 0°C.
- 3) El platino tiene un factor de temperatura de resistencia positivo; la resistencia aumenta con el aumento de la temperatura.
- 4) La variación de resistencia es en función de la temperatura:  $3.85\Omega/^{\circ}\text{C}$  nominal.
- 5) Alta precisión y estabilidad en comparación con termopares, sensores de temperatura basados en silicio o termistores.

Cada sensor viene con tres cables. Dos de los cables se conectan a ambos lados de la resistencia de platino. El tercer cable también está conectado a un extremo del PT – 100. Si su amplificador de RTD soporta sensores de 3 hilos, conectará la resistencia con los dos primeros cables y medirá las diferencias de tensión de modo que pueda sustraer cualquier caída de voltaje de los cables. (Electronilab, 2019)

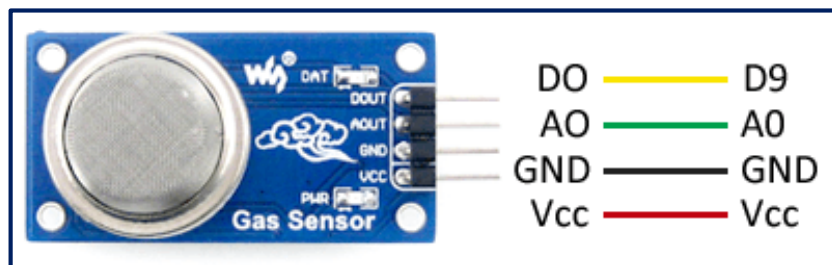
### 3.5.7. SENSOR MQ – 6 Y MQ – 9

Los sensores de calidad de aire MQ son dispositivos electrónicos diseñados para detectar la presencia de distintos componentes químicos que se encuentran en el aire así como detección de gases inflamables, calidad de aire, detección de alcohol, etc. Podemos conectar estos dispositivos a un autómata PLC o un procesador como Arduino, que permite obtener la lectura tanto en analógico como en valor digital, cuando se supera un cierto umbral regulado a través de un potenciómetro ubicado en la placa. Estos sensores requieren ser calibrados antes de obtener una medida exacta.

#### Esquema De Conexión

El esquema eléctrico es sencillo. Se alimenta el módulo conectando GND y 5V a los pines correspondientes. Y si queremos usar la lectura digital, conectamos la salida DO a una de las entradas digitales.

**Figura 3.11:** Esquema de conexión del sensor MQ



**Fuente:** (LLAMAS, 2019)

### 3.5.8. COMPRESORA DE AIRE

Es una máquina electromecánica que absorbe el aire a presión atmosférica, para luego comprimir dentro del compresor o tanque hasta que la presión sea superior, esto gracias a que el compresor de pistones es movido por un motor eléctrico de 2.5 hp, esta máquina está diseñada y construida para comprimir un fluido compresible, así como el aire u otro tipo de gas, y desplazar a través de cañerías, tuberías, o mangueras, de alta

presión, con la finalidad de dar un uso adecuado en los sistemas neumáticos para los fines que se requiera.

**Figura 3.12:** Compresora de aire de 1.5 HP



Elaborado por el equipo de trabajo.

### **Elección del compresor de aire**

Para elegir adecuadamente un compresor de aire se debe tener en cuenta ciertas características técnicas para el fin requerido.

El tanque: es donde se aloja el aire comprimido, y presenta diferentes dimensiones o mediadas cilíndricas, cuando es más grande el tanque, más aire se podrá almacenar.

Caudal de aire: cada compresora es capaz de suministrar un caudal de aire a una presión determinada y una potencia diferente, entonces se debe tener en cuenta, la presión y el consumo requerido, para elegir adecuadamente.

### **3.5.9. RIEL DIN**

Es una estructura de metal duro, de tipo barra normalizada, es muy usado en aplicaciones industriales, comerciales y viviendas, para montajes de elementos o dispositivos eléctricos de protección y mando.

**Figura 3.13:** Riel Din metálico de aluminio

Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.6. DISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL

Para la presente investigación de diseño de un controlador difuso aplicado a hornos industrias de petróleo, se vio por conveniente utilizar materiales que facilitan el diseño de nuestro controlador para ello se usaron materiales que se describen líneas abajo.

Para el diseño del soporte de sistema de control y de mando se diseña, a base a piezas de estructuras de aluminio, de tipo barra rectangular, adicional a esto se coloca un soporte tipo de tipo canaleta plastificado para el soporte de conductores eléctricos, también se implementa como soporte de pulsadores y señalizadores una placa de vidrio transparente de medidas de 20x30 cm. En la parte central de la estructura de diseño rectangular se instala un Riel Din, de medidas de 300 x 35 x 7.5 mm.

Seguidamente se instala un controlador lógico programable (PLC LOGO), de marca SIEMENS, con su respectiva fuente de alimentación y módulo de expansión de entrada y salida analógica, también se implementa como dispositivo de protección de corriente alterna monofásica de 220V un interruptor termomagnético, donde este dispositivo garantiza la protección de los circuitos del control. Adicionalmente se usa un sensores de temperatura PT – 100 Din-B, el cual se encuentra ubica el parte inferior de la chimenea, el otro sensor que usa es el sensor de calidad de aire MQ – 6 y MQ – 9, estos



sensores permiten realizar el monitoreo de los gases de escape que emite el horno experimental, ambos se encuentran ubicados el parte superior de la chimenea del prototipo experimental, finalmente se usa un electroválvula modular inteligente 02T para controlar el ingreso del aire al quemador.

**Figura 3.14:** Estructura y armado del módulo de control

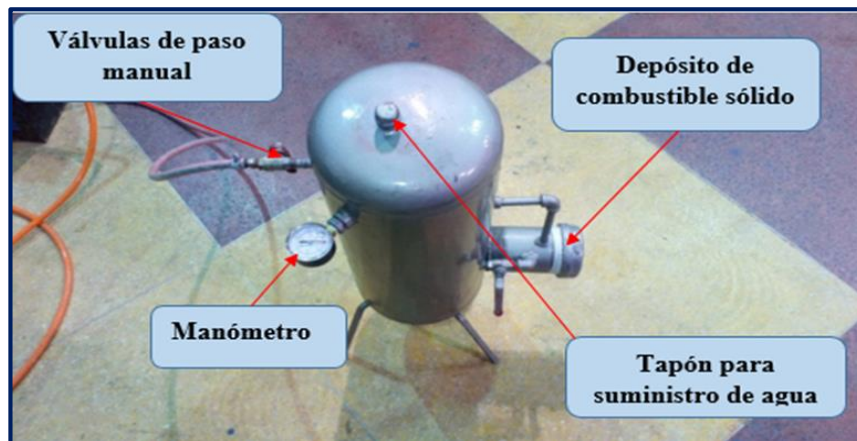


Elaborado por el equipo de trabajo.

### **3.7. DISEÑO MECÁNICO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL**

#### **Diseño del tanque para combustible gaseoso de alta presión**

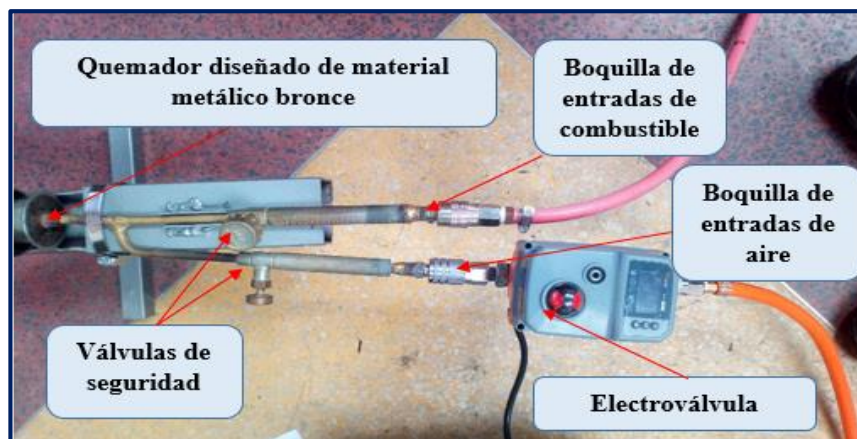
El tanque de alta presión está diseñado de material de acero inoxidable, de volumen de 0.89 m<sup>3</sup>, para ver el estado de la presión de combustible, se instala un manómetro de capacidad máxima de 150 Psi, adicionalmente se instala una válvula de ¼" regulable manual el cual permitir la salida del combustible y la conexión con la manguera externa, en la parte posterior se instala un dispositivo tipo cilíndrico que aloja el combustible sólido carburo que reacciona al entrar en contacto con el agua para luego producir el combustible gaseoso, finamente este combustible se usa para realizar las pruebas experimentales a presión constantes de 5 a 30 Psi.

**Figura 3.15:** Tanque de presión para combustible gaseoso

Elaborado por el equipo de trabajo.

### Diseño del quemador

El quemador está diseñado a base de cañerías de bronce, que consta de un quemador de llama o fuego, que este mismo es alimentado por dos cañerías, uno permite la entrada de combustible a presión constante con su respectivo válvula regulable de apertura y cierre manual. La otra cañería permite el ingreso de aire ambiental a presión variable, controlado por la electroválvula modular inteligente 02T, que también dispone de una válvula regulable manual, estas dos entradas se unen en la parte central del diseño y se conectan directamente con el quemador. La finalidad del quemador es quemar la mesclan aire combustible.

**Figura 3.16:** Quemador metálico de bronce

Elaborado por el equipo de trabajo.



### Diseño del Tubo de Escape y Chimenea

El tubo de escape, se fabrica de un tubería de Acero galvanizado, de medida estándar de 3.00 metros de longitud el cual aloja en la entrada al dispositivo quemador, la chimenea tienen una forma cilíndrica con un diámetro de 10.00 cm y alto de 20.00 cm, el soporte de verticalidad se fabrica de material de Platino acerado de tipo barrar rectangular de medidas 20 cm y 30 cm, con estas piezas se logra la verticalidad del tubo de escape y chimenea.

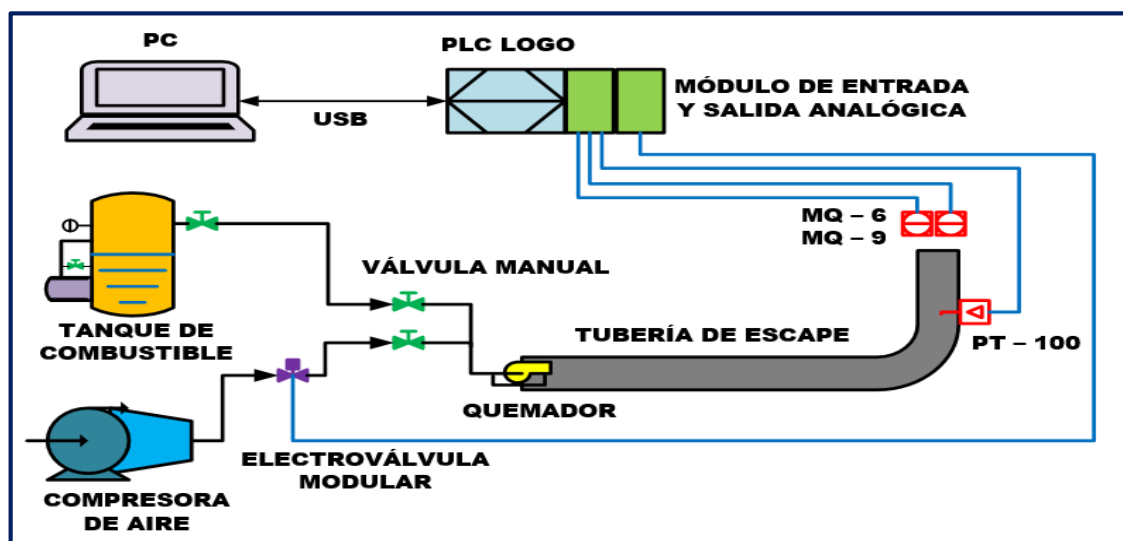
Figura 3.17: Tubo de escape y chimenea



Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.8. DISEÑO DEL DIAGRAMA EXPERIMENTAL

Figura 3.18: Diagrama del proceso experimental



Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.8.1. PROCESO EXPERIMENTAL

**Primero:** Se verifica que todas las válvulas manuales estén bien cerradas, seguidamente se enciende el compresor de aire, posterior a ello se realiza la generación de combustible gaseoso, este proceso se realiza en la parte externa del tanque de combustible.

**Segundo:** Se encienden el PC y PLC LOGO SIEMENS; seguidamente se verifica el correcto funcionamiento de los sensores PT – 100, MQ – 6 y MQ – 9 y la electroválvula modular inteligente 02T.

**Tercero:** Se realizan las pruebas experimentales aplicando los métodos de inferencia difusa de Mandani y Tsukamoto en función de la temperatura, contaminación.

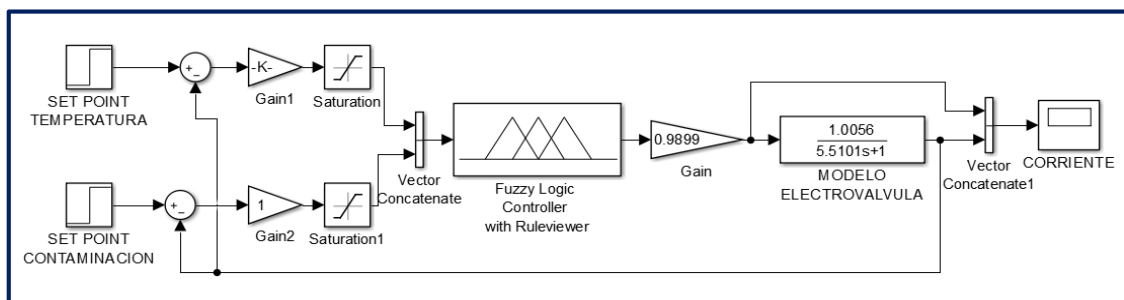
## 3.9. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO

Para el diseño del controlador difuso es necesario conocer el diagrama de bloques del control del sistema, las variables lingüísticas, términos lingüísticos, universo de discurso, funciones de membresía, reglas de control y un método de inferencia difusa.

### 3.9.1. DIAGRAMA DE BLOQUES CON PROBLEMA SERVO

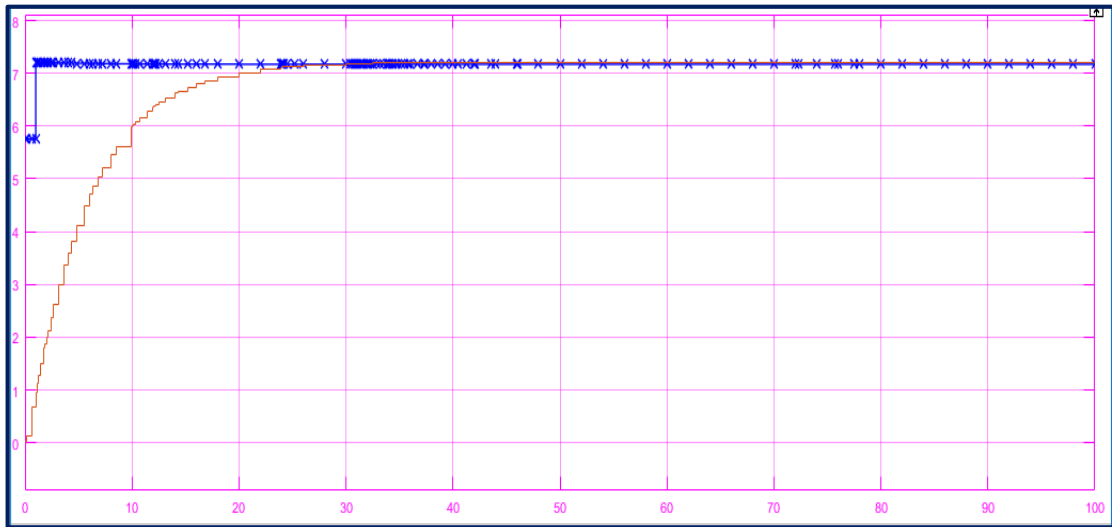
El diseño del diagrama de bloques con problema servo consiste en manipular los valores de la entrada de referencia. Para el proceso a controlar se tiene dos variables de entrada, temperatura (T) y contaminación (monóxido de carbono (CO)). Como salida del controlador difuso tenemos la variable corriente (I) y su respectiva señal de estabilización.

**Figura 3.19:** Diagrama de control con problema servo



Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 3.20:** Grafica de estabilidad experimental con problema servo

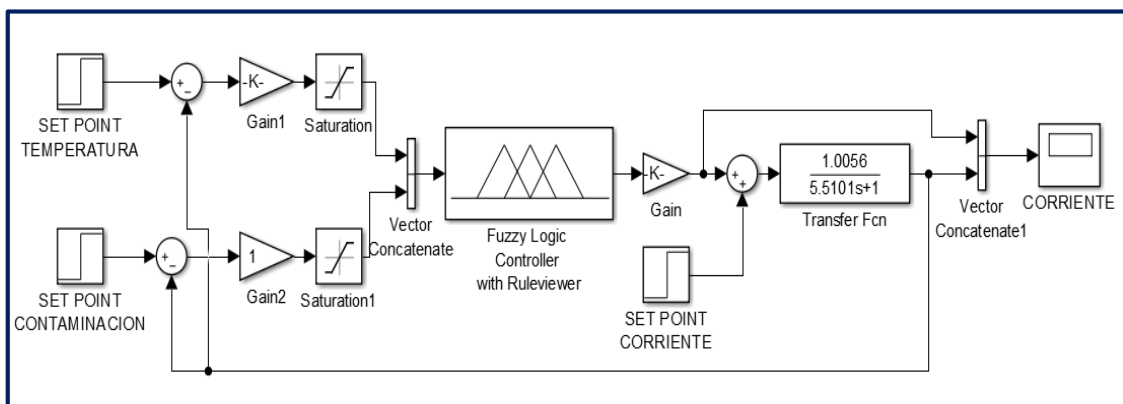


Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.9.2. DIAGRAMA DE BLOQUES CON PROBLEMA REGULADO

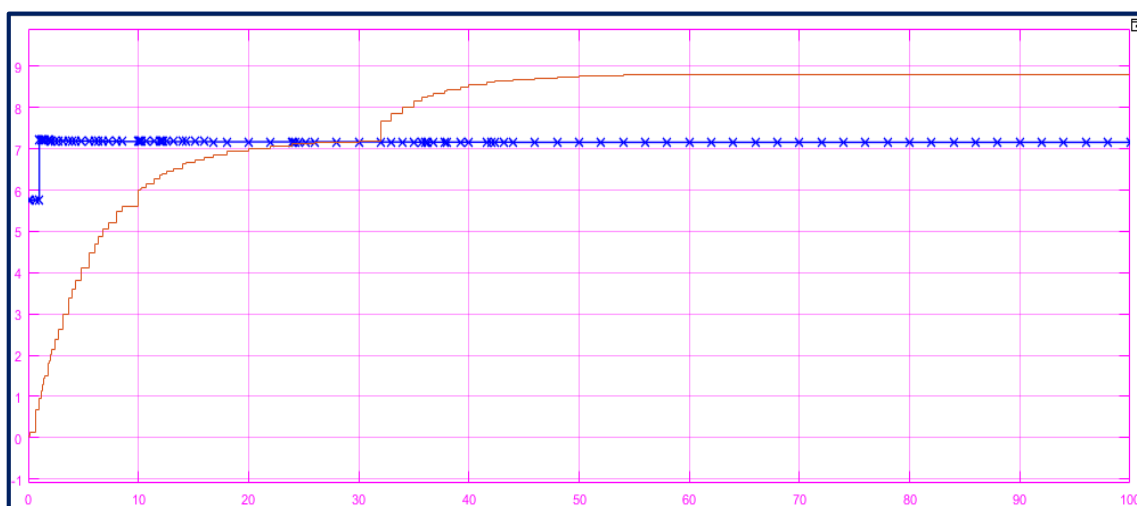
El diseño del diagrama de bloques con problema regulado consiste en mantener los valores de la entrada de referencia como valores constantes, seguidamente es generar una perturbación externa. Para dicha perturbación se considera la entrada del aire, manipulando la variable corriente (I) se genera una inestabilidad del sistema controlado, esta permite el giro de la válvula, el cual es representado en un porcentaje de apertura para el ingreso de aire.

**Figura 3.21:** Diagrama de bloques con problema regulado



Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 3.22:** Grafica de estabilidad experimental con problema regulado



Elaborado por el equipo de trabajo.

**Determinación de Variables lingüísticas**

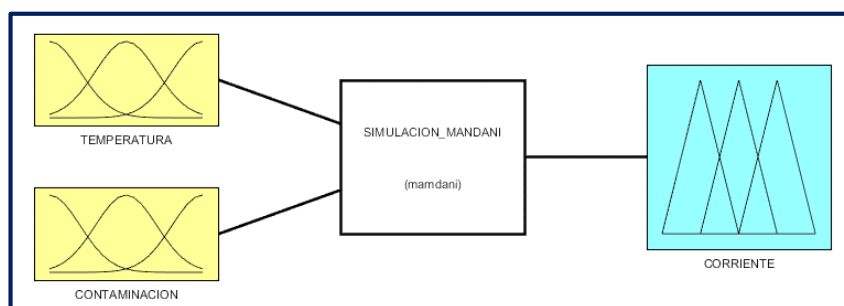
La determinación de las variables lingüísticas de entradas y salidas del controlador difuso es fundamental, debido a que nos permite definir los términos lingüísticos y conjuntos difusos de cada variable.

**Tabla 3.3:** Variables lingüísticas de entradas y Salidas

Variables lingüísticas de Entradas y Salidas	
Variables de entrada	Variables de salida
Temperatura	Corriente
Contaminación	

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 3.23:** Diseño del control difuso en FuzzyLogicDesigner



Elaborado por el equipo de trabajo.

### Determinación del Universo de discurso

La determinación del universo del discurso, nos permite conocer el rango de extensión mínima y máxima de cada sensor o instrumento que se emplea.

**Tabla 3.4:** Determinación del universo de discurso de las variables

Universo de discurso de las variables del control difuso	
Variable lingüística	Universo de discurso (X)
Temperatura	0 °C a 200 °C
Contaminación	0 Ppm a 4000 Ppm
Corriente	4 mA a 20 mA

Elaborado por el equipo de trabajo.

### Determinación de la Función de pertenencia

Las funciones de membresía, que se ha elegido para el control difuso, son de tipo Trapezoidal y Triangular y Sigmoidal.

### 3.9.3. MÉTODO DE INFERENCIA DE MANDANI

**Set Point:** es la temperatura, que va de (0 a 200) °C, contaminación que va de (0 a 4000) PPM.

**V.L Temperatura:** Para la variable lingüística temperatura, se definen 5 (cinco) términos lingüísticos, donde estos términos permitirán controlar y monitorear la temperatura del prototipo experimental adecuadamente, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.5:** Valores lingüístico de la V. temperatura

Términos lingüísticos		
Ítem	T.L	Significado
1	TMB	Temperatura Muy Baja
2	TB	Temperatura Baja
3	TP	Temperatura Promedio
4	TA	Temperatura Alta
5	TMA	Temperatura Muy Alta

Elaborado por el equipo de trabajo.

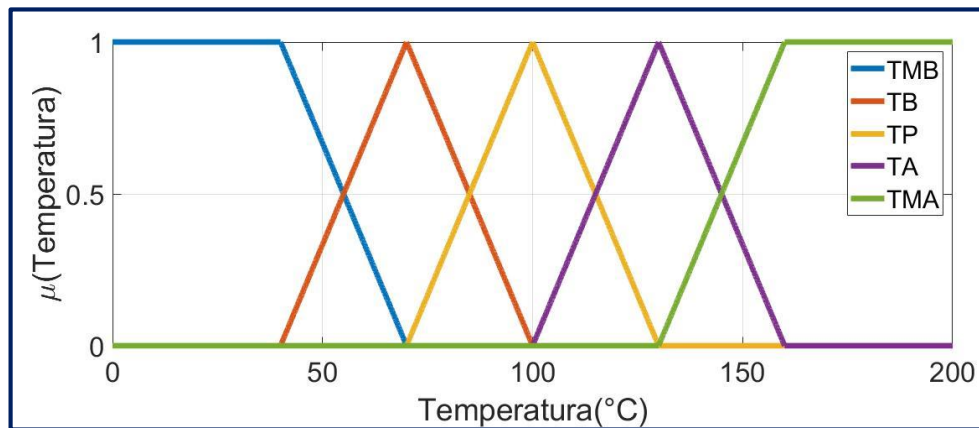
**Conjuntos difusos y función de membresía**

**Tabla 3.6:** Conjunto difuso y función de Membresía V. Temperatura

<b>Conjuntos difusos y función de membresía</b>			
<b>V.L</b>	<b>T.L</b>	<b>C. difusos</b>	<b>Función de membresía <math>\mu(x)</math></b>
<b>Temperatura</b>	TMB	[0 – 70]	Trapmf (e, [0, 0, 40, 70])
	TB	[40 – 100]	Trimf (e, [40, 70, 100])
	TP	[70 – 130]	Trimf (e, [70, 100, 130])
	TA	[100 – 160]	Trimf (e, [100, 130, 160])
	TMA	[130 – 200]	Trapmf (e, [130, 160, 200, 200])

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 3.24:** Representación gráfica FM. V. Temperatura



Elaborado por el equipo de trabajo.

**V.L Contaminación:** Para la variable lingüística contaminación, se definen cinco términos lingüísticos, las cuales se describen en la tabla que se presenta.

**Tabla 3.7:** Términos Lingüístico V. Contaminación

<b>Contaminación De Gases De Combustión</b>		
<b>Ítem</b>	<b>Contaminación</b>	<b>Descripción</b>
1	CMB	Contaminación Muy Bajo
2	CB	Contaminación Bajo
3	CP	Contaminación Medio
4	CA	Contaminación Alto
5	CMA	Contaminación Muy Alto

Elaborado por el equipo de trabajo.

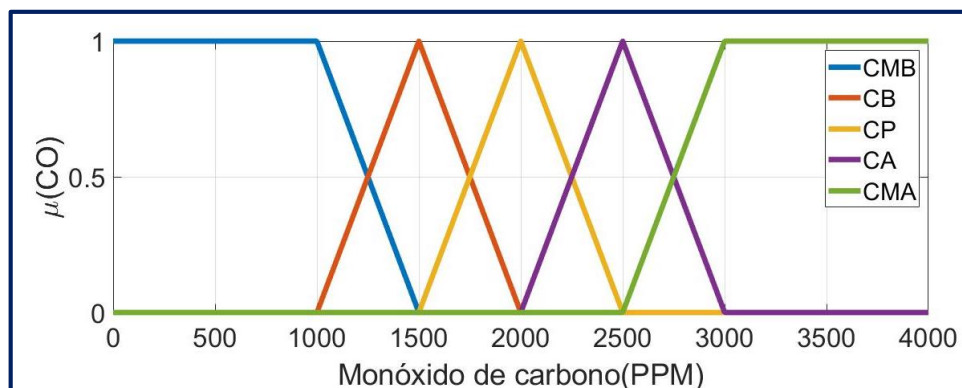
**Conjuntos Difusos y Función de Membresía**

**Tabla 3.8:** Conjuntos difusos y FM. V. Contaminación

Conjuntos difusos			
V.L	T.L	C. difuso	Función de membresía $\mu(x)$
Contaminación	CMB	[0 – 1500]	Trapmf (c, [0, 0, 1000, 1500])
	CB	[1000 – 2000]	Trimf (c, [1000, 1500, 2000])
	CP	[1500 – 2500]	Trimf (c, [1500, 2000, 2500])
	CA	[2000 – 3000]	Trimf (c, [2000, 2500, 3000])
	CMA	[2500 – 4000]	Trapmf (c, [2500, 3000, 4000, 4000])

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 3.25:** Representación gráfica FM. V. Contaminación



Elaborado por el equipo de trabajo.

**V.L Corriente:** Para la variable lingüística corriente, se definen cinco valores lingüísticos, el cual se ilustra en la siguiente tabla.

**Tabla 3.9:** Términos lingüísticos V. Corriente

Corriente inyectado a la electroválvula		
Ítem	Caudal	Descripción
1	IMB	Corriente Muy Bajo
2	IB	Corriente Bajo
3	IM	Corriente Medio
4	IA	Corriente Alto
5	IMA	Corriente Muy Alto

Elaborado por el equipo de trabajo.

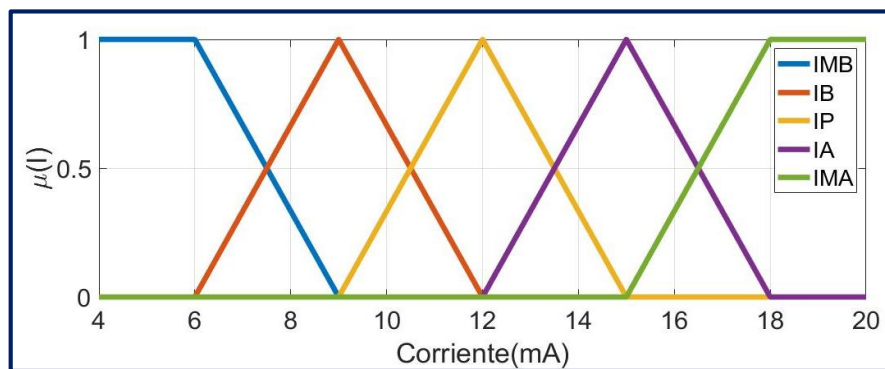
**Conjuntos difusos y Función de Membresía**

**Tabla 3.10:** Conjuntos difusos y función de membresía V. Corriente

Conjuntos difusos			
V.L	T.L	C. difuso	Función de membresía $\mu(x)$
Corriente	IMB	[4 – 9]	Trapmf (c, [4, 4, 6, 9])
	IB	[6 – 12]	Trimf (c, [6, 9, 12])
	IM	[9 – 15]	Trimf (c, [9, 12, 15])
	IA	[12 – 18]	Trimf (c, [12, 15, 18])
	IMA	[15 – 20]	Trapmf (c, [15, 18, 20, 20])

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 3.26:** Representación gráfica FM. V. corriente



Elaborado por el equipo de trabajo.

**Reglas de control**

Según el número de variables de entradas y salidas y funciones de membresía, será el número de reglas a generar.

**Tabla 3.11:** Reglas de control difuso variables (T, CON, I))

1	SI	TMB	Y	CMB	ENTONCES	IMB
2	SI	TB	Y	CB	ENTONCES	IB
3	SI	TP	Y	CP	ENTONCES	IP
4	SI	TA	Y	CA	ENTONCES	IA
5	SI	TMA	Y	CMA	ENTONCES	IMA
6	SI	TMB	Y	CB	ENTONCES	IB
7	SI	TMB	Y	CP	ENTONCES	IP
8	SI	TMB	Y	CA	ENTONCES	IA



9	SI	TMB	Y	CMA	ENTONCES	IMA
10	SI	TB	Y	CMB	ENTONCES	IMB
11	SI	TB	Y	CP	ENTONCES	IP
12	SI	TB	Y	CA	ENTONCES	IA
13	SI	TB	Y	CMA	ENTONCES	IMA
14	SI	TP	Y	CMB	ENTONCES	IMB
15	SI	TP	Y	CB	ENTONCES	IB
16	SI	TP	Y	CA	ENTONCES	IA
17	SI	TP	Y	CMA	ENTONCES	IMA
18	SI	TA	Y	CMB	ENTONCES	IMB
19	SI	TA	Y	CB	ENTONCES	IB
20	SI	TA	Y	CP	ENTONCES	IP
21	SI	TA	Y	CMA	ENTONCES	IMA
22	SI	TMA	Y	CMB	ENTONCES	IMB
23	SI	TMA	Y	CB	ENTONCES	IB
24	SI	TMA	Y	CP	ENTONCES	IP
25	SI	TMA	Y	CA	ENTONCES	IA

Elaborado por el equipo de trabajo.

### Fusificación y Defusificación

Para la Fusificación se ha elegido el método mínimo como (and) y la Defusificación se elige el método del Centroide en la interfaz gráfica de fuzzyLogicDesigner.

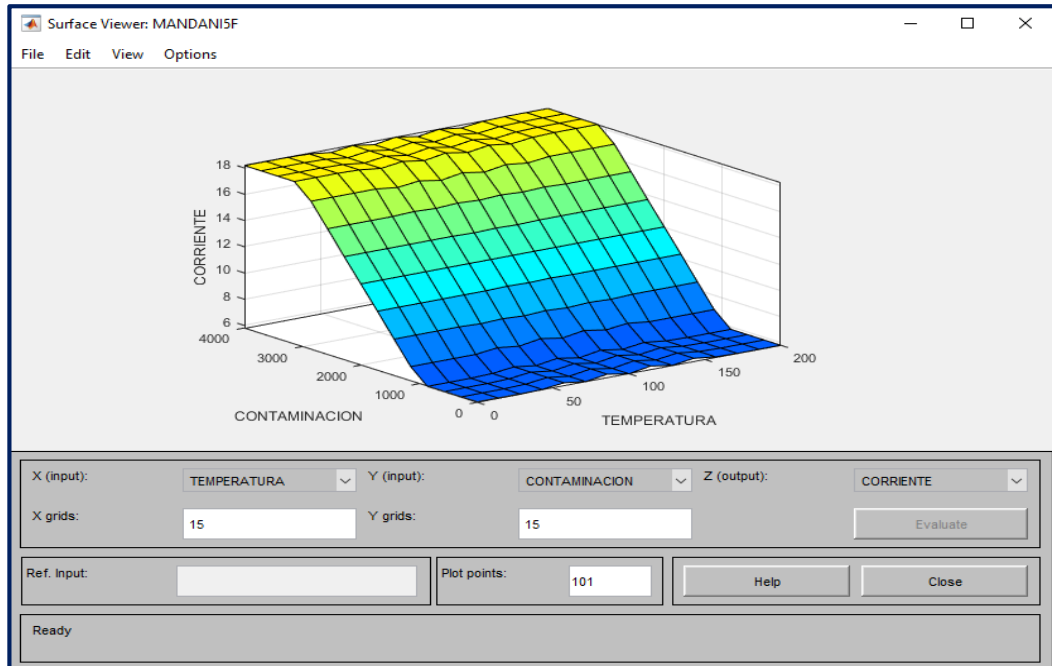
**Figura 3.27:** Fusificación y Defusificación M. Mandani



Elaborado por el equipo de trabajo.

**Superficie de control**

**Figura 3.28:** Superficie de control M. Mandani



Elaborado por el equipo de trabajo.

**3.9.4. MÉTODO DE INFERENCIA DE TSUKAMOTO**

Este método es una simplificación de controlador de Mandani el cual facilita el diseño del controlador de manera más simplificada, para llegar a la conclusión, que únicamente permite definir funciones de membresía abiertas por la derecha e izquierda.

**Determinación de Variables**

**V.L Temperatura:** Para la variable lingüística temperatura del prototipo experimental, se definen 2 (dos) términos lingüísticos, las cuales se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.12:** Términos lingüístico V. temperatura M. Tsukamoto

Términos Lingüísticos V. Temperatura		
Ítem	T.L	Descripción
1	TB	Temperatura Baja
2	TA	Temperatura Alta

Elaborado por el equipo de trabajo.

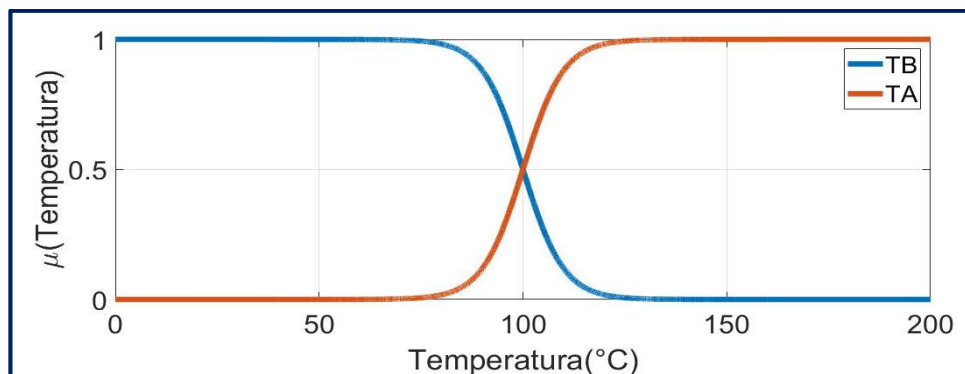
**Conjuntos difusos y Función de Membresía**

**Tabla 3.13:** Conjuntos difuso y F.M V. Temperatura

<b>Conjuntos Difusos y Función de Membresía</b>			
<b>V.L</b>	<b>T.L</b>	<b>C. difusos</b>	<b>Función de Membresía <math>\mu(x)</math></b>
<b>Temperatura</b>	TB	0 – 200	Sigmf(t, [-200, 0])
	TA	0 – 200	Sigmf(t, [200, 0])

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 3.29:** Grafico función de membresía V.T



Elaborado por el equipo de trabajo.

**V.L Contaminación:** Para la variable lingüística emisión de gases de combustión, se definen 2 (dos) términos, las cuales se mencionan en la siguiente tabla.

**Tabla 3.14:** Términos Lingüísticos V. Contaminación M. Tsukamoto

<b>Términos lingüísticos V. Contaminación</b>		
<b>Ítem</b>	<b>T.L</b>	<b>Descripción</b>
1	CB	Contaminación Bajo
2	CA	Contaminación Alto

Elaborado por el equipo de trabajo.

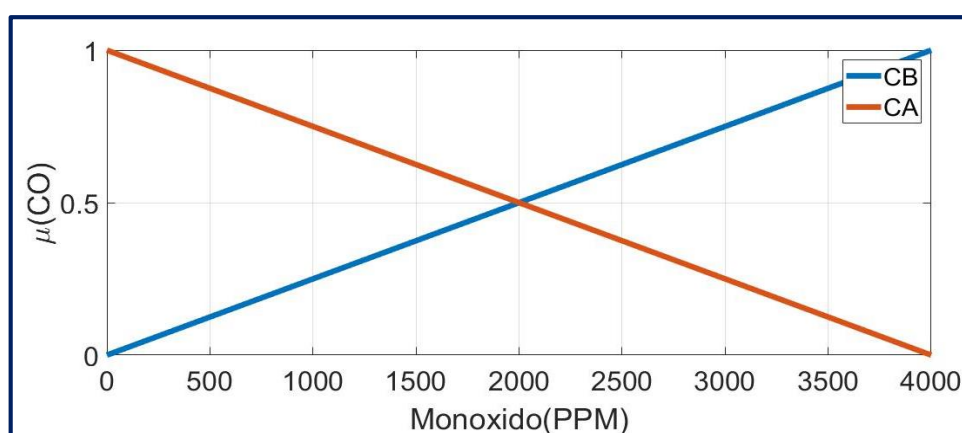
**Conjuntos difusos y Función de Membresía**

**Tabla 3.15:** Conjuntos Difuso y F.M V. Contaminación

Conjuntos difusos y Función de Membresía			
V.L	T.L	C. difusos	Función de membresía $\mu(x)$
Contaminación	CB	0 – 4000	Trimf(e, [0, 4000, 4000])
	CA	0 – 4000	Trimf(e, [0, 0, 4000])

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 3.30:** Grafico función de Membresía T. lingüísticos V.C



Elaborado por el equipo de trabajo.

**V.L Corriente:** Para la variable corriente, se definen 2 (Dos) términos lingüísticos el cual se ilustra en la siguiente tabla.

**Tabla 3.16:** Términos Lingüísticos V. Corriente M. Tsukamoto

Términos lingüísticos V. Corriente		
Ítem	T.L	Descripción
1	IB	Corriente baja
2	IA	Corriente alta

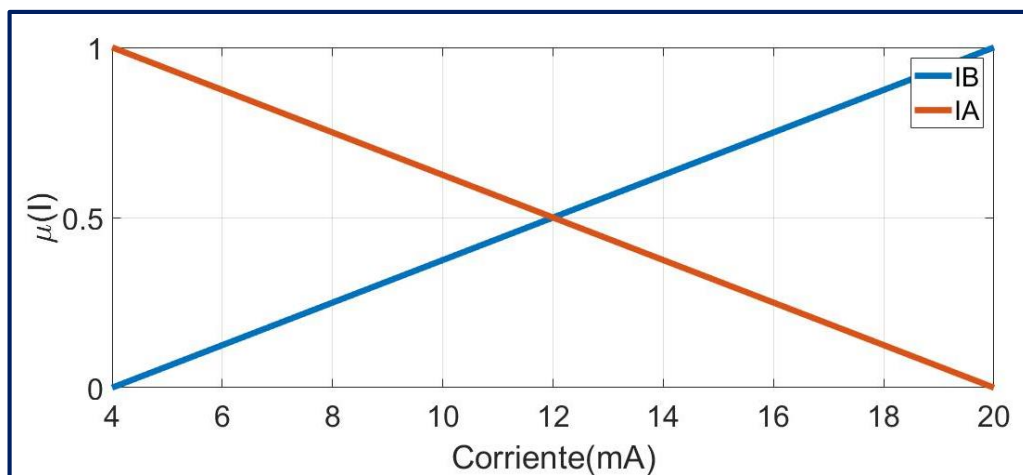
Elaborado por el equipo de trabajo.

**Tabla 3.17:** Conjuntos Difuso y F.M V. Corriente

Conjuntos difusos y Función de Membresía			
V.L	T.L	C. difuso	Función de membresía $\mu(x)$
Corriente	IB	4 – 20	Trimf(i, [4, 20, 20])
	IA	4 – 20	Trimf(i, [4, 4, 20])

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 3.31:** Grafico Función de Membresía T. lingüísticos V.I



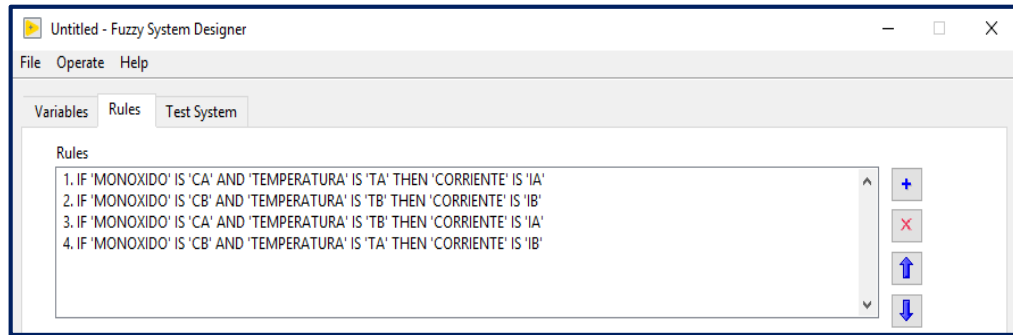
Elaborado por el equipo de trabajo.

**Reglas de control**

Las reglas de control difuso aplicado al control de Tsukamoto, tiene dos antecedentes como entradas y se tienen una salida como consecuente, de los cuales se definen cuatro reglas lingüísticas SI – ENTONCES, para el control del sistema.

1. Si contaminación CB y Temperatura es TB, entonces Corrientes es IB
2. Si contaminación es CA y Temperatura es TA, entonces Corrientes es IA
3. Si contaminación es CA y Temperatura es TB, Entonces Corriente es IA
4. Si contaminación es CB y Temperatura es TA, Entonces Corriente es IB

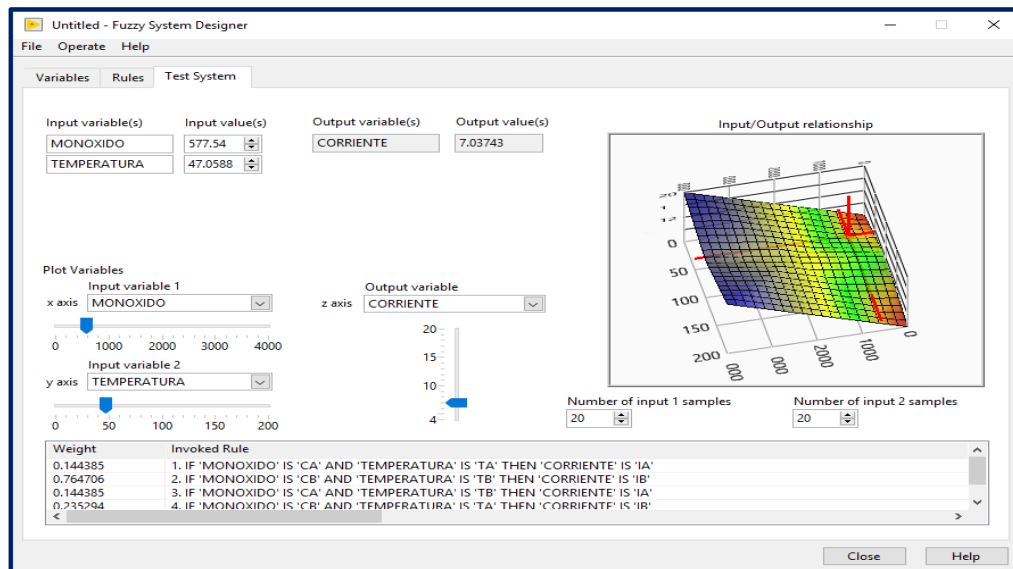
**Figura 3.32:** Reglas de control M. TSKM



Elaborado por el equipo de trabajo.

### Fusificación y superficie de control

**Figura 3.33:** Gráfica Superficie de Control M. TSKM



Elaborado por el equipo de trabajo.

## 3.10. SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE DATOS

### 3.10.1. MATLAB (MATRIX LABORATORY)

Matlab((Laboratorio Matricial) es una sofisticada herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, que permite realizar cálculos numéricos, visualización y desarrollo de aplicaciones, cuenta con funciones matemáticas para el álgebra lineal, estadísticas,

análisis de Fourier, optimización, integración numérica, diseño y simulación de proceso de control, y la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias, cuenta con gráficos integrados para la visualización de datos en dos y tres dimensiones y herramientas para la creación de diagramas personalizados, además tiene funciones para integrar los algoritmos basados en Matlab con aplicaciones externas y lenguajes como C++, Java y programas como Microsoft Excel.

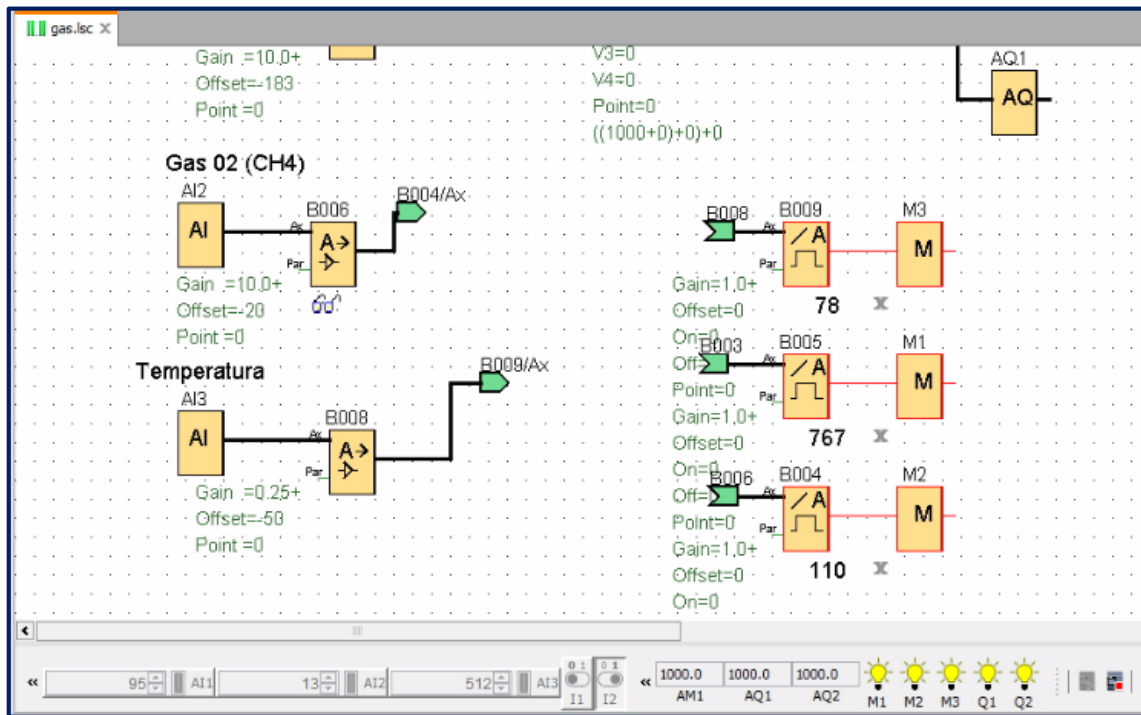
### **3.10.2. LABVIEW**

Labview (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) Es un plataforma de entorno de lenguaje de programación visual gráfico, recomendado para sistemas hardware y software de prueba, control y diseño, simulado o real y embebido, puesto que acelera la productividad. El lenguaje que usa es el lenguaje G, simboliza que es el lenguaje gráfico. Esta herramienta es de código abierto de alto nivel de programación que sirve para interactuar mediante la computadora con sistemas mecánicos, como controlar brazos robóticos, plantas de producción, industrias de energía solar. Además posibilita la programación de, PLC's, Arduinos, memorias RAM, memorias ROM.

### **3.11. ADQUISICION DE DATOS EXPERIMENTALES**

La adquisición de datos es una de las más importantes en un sistema de control automático, puesto que de ello depende en gran medida que nuestro diseño del controlador difuso sea lo más adecuado, Donde los datos son mostrados en la interfaz gráfica del software LogoSoft, enseguida los datos mostrados por cada sensor son gravados en la pantalla del PC con la ayuda del software Camtasia Studio 8, para que finalmente estos datos sean digitados en un libro de Excel.

Figura 3.34: Diagrama de Control con el Software LogoSoft



Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 3.18: Adquisición de Datos Experimentales

Procesamiento de Datos Experimentales								
Tiemp (Seg)	T (°C)	% (T)	CO (PPM)	% (CO)	CH4 (PPM)	% (CH4)	I (mA)	(%) G.V
0.00	14.00	7.00%	17.00	0.43%	10.00	0.25%	4.00	0.00%
0.50	14.00	7.00%	14.00	0.35%	0.00	0.00%	4.10	0.62%
1.00	14.00	7.00%	27.00	0.68%	0.00	0.00%	4.00	0.00%
1.50	15.00	7.50%	27.00	0.68%	10.00	0.25%	4.10	0.62%
2.00	15.00	7.50%	17.00	0.43%	0.00	0.00%	4.00	0.00%
2.50	15.00	7.50%	17.00	0.43%	10.00	0.25%	4.20	1.25%
3.00	15.00	7.50%	47.00	1.18%	10.00	0.25%	4.00	0.00%
3.50	15.00	7.50%	37.00	0.93%	20.00	0.50%	4.10	0.62%
4.00	15.00	7.50%	107.00	2.68%	60.00	1.50%	4.20	1.25%
4.50	15.00	7.50%	197.00	4.93%	90.00	2.25%	4.10	0.62%
5.00	15.00	7.50%	477.00	11.93%	620.00	15.50%	4.30	1.88%
5.50	15.00	7.50%	1137.00	28.43%	1490.00	37.25%	4.20	1.25%
6.00	15.00	7.50%	3127.00	78.18%	2780.00	69.50%	4.30	1.88%
6.50	15.00	7.50%	3767.00	94.18%	3760.00	94.00%	4.20	1.25%
7.00	15.00	7.50%	3827.00	95.68%	3777.00	94.43%	4.30	1.88%
7.50	15.00	7.50%	3867.00	96.68%	3577.00	89.43%	4.20	1.25%
8.00	15.00	7.50%	3857.00	96.43%	2567.00	64.18%	4.30	1.88%
8.50	16.00	8.00%	3557.00	88.93%	310.00	7.75%	4.30	1.88%



9.00	16.00	8.00%	3567.00	89.18%	290.00	7.25%	4.20	1.25%
9.50	16.00	8.00%	3527.00	88.18%	270.00	6.75%	4.30	1.88%
10.00	16.00	8.00%	3527.00	88.18%	260.00	6.50%	4.40	2.50%
10.50	16.00	8.00%	3517.00	87.93%	200.00	5.00%	4.30	1.88%
11.00	17.00	8.50%	3457.00	86.43%	190.00	4.75%	4.40	2.50%
11.50	17.00	8.50%	3517.00	87.93%	160.00	4.00%	4.50	3.13%
12.00	17.00	8.50%	3517.00	87.93%	200.00	5.00%	4.40	2.50%
12.50	17.00	8.50%	3507.00	87.68%	210.00	5.25%	4.50	3.13%
13.00	17.00	8.50%	3527.00	88.18%	300.00	7.50%	4.50	3.13%
13.50	17.00	8.50%	3517.00	87.93%	300.00	7.50%	4.30	1.88%
14.00	18.00	9.00%	3527.00	88.18%	420.00	10.50%	4.40	2.50%
14.50	18.00	9.00%	3537.00	88.43%	560.00	14.00%	4.50	3.13%
15.00	18.00	9.00%	3587.00	89.68%	610.00	15.25%	4.50	3.13%
15.50	18.00	9.00%	3587.00	89.68%	680.00	17.00%	4.40	2.50%
16.00	18.00	9.00%	3527.00	88.18%	730.00	18.25%	4.50	3.13%
16.50	19.00	9.50%	3557.00	88.93%	720.00	18.00%	4.40	2.50%
17.00	19.00	9.50%	3547.00	88.68%	600.00	15.00%	4.50	3.13%
17.50	19.00	9.50%	3557.00	88.93%	460.00	11.50%	4.50	3.13%
18.00	19.00	9.50%	3567.00	89.18%	490.00	12.25%	4.50	3.13%
18.50	19.00	9.50%	3567.00	89.18%	460.00	11.50%	4.50	3.13%
19.00	19.00	9.50%	3537.00	88.43%	390.00	9.75%	4.40	2.50%
19.50	19.00	9.50%	3507.00	87.68%	440.00	11.00%	4.50	3.13%
20.00	19.00	9.50%	3517.00	87.93%	430.00	10.75%	4.50	3.13%
20.50	20.00	10.00%	3517.00	87.93%	410.00	10.25%	4.40	2.50%
21.00	20.00	10.00%	3527.00	88.18%	420.00	10.50%	4.50	3.13%
21.50	20.00	10.00%	3517.00	87.93%	400.00	10.00%	4.50	3.13%
22.00	20.00	10.00%	3497.00	87.43%	490.00	12.25%	4.45	2.81%
22.50	20.00	10.00%	3517.00	87.93%	400.00	10.00%	4.60	3.75%
23.00	20.00	10.00%	3507.00	87.68%	420.00	10.50%	4.60	3.75%
23.50	20.00	10.00%	3467.00	86.68%	420.00	10.50%	4.50	3.13%
24.00	21.00	10.50%	3447.00	86.18%	370.00	9.25%	4.60	3.75%
24.50	21.00	10.50%	3407.00	85.18%	380.00	9.50%	4.60	3.75%
25.00	21.00	10.50%	3437.00	85.93%	340.00	8.50%	4.55	3.44%
25.50	21.00	10.50%	3367.00	84.18%	220.00	5.50%	4.60	3.75%
26.00	22.00	11.00%	3307.00	82.68%	190.00	4.75%	4.60	3.75%
26.50	22.00	11.00%	3257.00	81.43%	180.00	4.50%	4.60	3.75%
27.00	22.00	11.00%	3267.00	81.68%	170.00	4.25%	4.59	3.69%
27.50	22.00	11.00%	3297.00	82.43%	180.00	4.50%	4.60	3.75%
28.00	23.00	11.50%	3107.00	77.68%	160.00	4.00%	4.70	4.38%
28.50	23.00	11.50%	2937.00	73.43%	150.00	3.75%	4.80	5.00%
29.00	23.00	11.50%	2897.00	72.43%	160.00	4.00%	4.90	5.63%
29.50	23.00	11.50%	2797.00	69.93%	160.00	4.00%	5.20	7.50%
30.00	23.00	11.50%	2607.00	65.18%	150.00	3.75%	5.30	8.13%
30.50	23.00	11.50%	2477.00	61.93%	160.00	4.00%	5.50	9.38%
31.00	23.00	11.50%	2357.00	58.93%	160.00	4.00%	5.40	8.75%

31.50	23.00	11.50%	2277.00	56.93%	160.00	4.00%	5.60	10.00%
32.00	23.00	11.50%	1917.00	47.93%	170.00	4.25%	5.60	10.00%
32.50	23.00	11.50%	1467.00	36.68%	170.00	4.25%	5.60	10.00%
33.00	24.00	12.00%	1337.00	33.43%	150.00	3.75%	5.80	11.25%
33.50	24.00	12.00%	927.00	23.18%	160.00	4.00%	5.90	11.88%
34.00	24.00	12.00%	897.00	22.43%	160.00	4.00%	6.20	13.75%
34.50	24.00	12.00%	897.00	22.43%	170.00	4.25%	6.40	15.00%
35.00	24.00	12.00%	857.00	21.43%	170.00	4.25%	6.60	16.25%
35.50	24.00	12.00%	837.00	20.93%	170.00	4.25%	6.80	17.50%
36.00	24.00	12.00%	837.00	20.93%	160.00	4.00%	6.80	17.50%
36.50	24.00	12.00%	817.00	20.43%	180.00	4.50%	6.90	18.13%
37.00	24.00	12.00%	787.00	19.68%	190.00	4.75%	7.10	19.38%
37.50	24.00	12.00%	767.00	19.18%	180.00	4.50%	7.30	20.63%
38.00	25.00	12.50%	747.00	18.68%	180.00	4.50%	7.40	21.25%
38.50	25.00	12.50%	687.00	17.18%	180.00	4.50%	7.30	20.63%
39.00	25.00	12.50%	677.00	16.93%	190.00	4.75%	7.40	21.25%
39.50	25.00	12.50%	647.00	16.18%	190.00	4.75%	7.50	21.88%
40.00	25.00	12.50%	657.00	16.43%	180.00	4.50%	7.70	23.13%
40.50	25.00	12.50%	647.00	16.18%	170.00	4.25%	7.60	22.50%
41.00	25.00	12.50%	637.00	15.93%	180.00	4.50%	7.70	23.13%
41.50	25.00	12.50%	617.00	15.43%	170.00	4.25%	7.90	24.38%
42.00	25.00	12.50%	617.00	15.43%	160.00	4.00%	8.20	26.25%
42.50	25.00	12.50%	597.00	14.93%	170.00	4.25%	8.30	26.88%
43.00	26.00	13.00%	527.00	13.18%	150.00	3.75%	8.20	26.25%
43.50	26.00	13.00%	517.00	12.93%	170.00	4.25%	8.40	27.50%
44.00	26.00	13.00%	527.00	13.18%	160.00	4.00%	8.50	28.13%
44.50	26.00	13.00%	487.00	12.18%	190.00	4.75%	8.60	28.75%
45.00	26.00	13.00%	527.00	13.18%	180.00	4.50%	8.50	28.13%
45.50	26.00	13.00%	467.00	11.68%	180.00	4.50%	8.70	29.38%
46.00	26.00	13.00%	457.00	11.43%	190.00	4.75%	8.60	28.75%
46.50	26.00	13.00%	447.00	11.18%	180.00	4.50%	8.80	30.00%
47.00	27.00	13.50%	317.00	7.93%	140.00	3.50%	8.70	29.38%
47.50	27.00	13.50%	317.00	7.93%	150.00	3.75%	8.70	29.38%
48.00	27.00	13.50%	357.00	8.93%	160.00	4.00%	8.90	30.63%
48.50	27.00	13.50%	387.00	9.68%	160.00	4.00%	9.00	31.25%
49.00	27.00	13.50%	437.00	10.93%	200.00	5.00%	8.90	30.63%
49.50	27.00	13.50%	427.00	10.68%	210.00	5.25%	9.00	31.25%
50.00	27.00	13.50%	417.00	10.43%	190.00	4.75%	9.10	31.88%
50.50	27.00	13.50%	397.00	9.93%	180.00	4.50%	8.90	30.63%
51.00	28.00	14.00%	327.00	8.18%	150.00	3.75%	9.10	31.88%
51.50	28.00	14.00%	314.00	7.85%	130.00	3.25%	9.00	31.25%
52.00	28.00	14.00%	287.00	7.18%	120.00	3.00%	9.10	31.88%
52.50	28.00	14.00%	287.00	7.18%	110.00	2.75%	9.00	31.25%
53.00	28.00	14.00%	267.00	6.68%	120.00	3.00%	9.10	31.88%
53.50	28.00	14.00%	257.00	6.43%	100.00	2.50%	9.20	32.50%

54.00	28.00	14.00%	237.00	5.93%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
54.50	28.00	14.00%	247.00	6.18%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
55.00	28.00	14.00%	237.00	5.93%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
55.50	29.00	14.50%	237.00	5.93%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
56.00	29.00	14.50%	257.00	6.43%	90.00	2.25%	9.30	33.13%
56.50	29.00	14.50%	227.00	5.68%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
57.00	29.00	14.50%	247.00	6.18%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
57.50	30.00	15.00%	237.00	5.93%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
58.00	30.00	15.00%	257.00	6.43%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
58.50	30.00	15.00%	277.00	6.93%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
59.00	30.00	15.00%	267.00	6.68%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
59.50	31.00	15.50%	257.00	6.43%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
60.00	31.00	15.50%	247.00	6.18%	100.00	2.50%	9.20	32.50%
60.50	32.00	16.00%	237.00	5.93%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
61.00	32.00	16.00%	267.00	6.68%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
61.50	32.00	16.00%	237.00	5.93%	100.00	2.50%	9.20	32.50%
62.00	32.00	16.00%	247.00	6.18%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
62.50	32.00	16.00%	257.00	6.43%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
63.00	32.00	16.00%	247.00	6.18%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
63.50	32.00	16.00%	267.00	6.68%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
64.00	33.00	16.50%	267.00	6.68%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
64.50	33.00	16.50%	277.00	6.93%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
65.00	33.00	16.50%	267.00	6.68%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
65.50	33.00	16.50%	257.00	6.43%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
66.00	34.00	17.00%	237.00	5.93%	100.00	2.50%	9.20	32.50%
66.50	34.00	17.00%	227.00	5.68%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
67.00	34.00	17.00%	247.00	6.18%	100.00	2.50%	9.20	32.50%
67.50	34.00	17.00%	277.00	6.93%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
68.00	34.00	17.00%	257.00	6.43%	100.00	2.50%	9.20	32.50%
68.50	35.00	17.50%	267.00	6.68%	90.00	2.25%	9.30	33.13%
69.00	35.00	17.50%	257.00	6.43%	100.00	2.50%	9.20	32.50%
69.50	35.00	17.50%	277.00	6.93%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
70.00	35.00	17.50%	287.00	7.18%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
70.50	35.00	17.50%	287.00	7.18%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
71.00	36.00	18.00%	377.00	9.43%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
71.50	36.00	18.00%	297.00	7.43%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
72.00	36.00	18.00%	317.00	7.93%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
72.50	36.00	18.00%	287.00	7.18%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
73.00	36.00	18.00%	207.00	5.18%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
73.50	36.00	18.00%	197.00	4.93%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
74.00	37.00	18.50%	187.00	4.68%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
74.50	37.00	18.50%	197.00	4.93%	120.00	3.00%	9.30	33.13%
75.00	37.00	18.50%	157.00	3.93%	100.00	2.50%	9.20	32.50%
75.50	37.00	18.50%	167.00	4.18%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
76.00	37.00	18.50%	197.00	4.93%	100.00	2.50%	9.20	32.50%

76.50	37.00	18.50%	207.00	5.18%	120.00	3.00%	9.30	33.13%
77.00	38.00	19.00%	217.00	5.43%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
77.50	38.00	19.00%	227.00	5.68%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
78.00	38.00	19.00%	237.00	5.93%	100.00	2.50%	9.20	32.50%
78.50	38.00	19.00%	247.00	6.18%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
79.00	38.00	19.00%	257.00	6.43%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
79.50	38.00	19.00%	277.00	6.93%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
80.00	39.00	19.50%	287.00	7.18%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
80.50	39.00	19.50%	297.00	7.43%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
81.00	39.00	19.50%	307.00	7.68%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
81.50	39.00	19.50%	297.00	7.43%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
82.00	39.00	19.50%	297.00	7.43%	120.00	3.00%	9.30	33.13%
82.50	39.00	19.50%	307.00	7.68%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
83.00	40.00	20.00%	257.00	6.43%	120.00	3.00%	9.20	32.50%
83.50	40.00	20.00%	267.00	6.68%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
84.00	40.00	20.00%	287.00	7.18%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
84.50	40.00	20.00%	297.00	7.43%	120.00	3.00%	9.30	33.13%
85.00	40.00	20.00%	307.00	7.68%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
85.50	40.00	20.00%	297.00	7.43%	120.00	3.00%	9.30	33.13%
86.00	41.00	20.50%	307.00	7.68%	100.00	2.50%	9.20	32.50%
86.50	41.00	20.50%	297.00	7.43%	120.00	3.00%	9.30	33.13%
87.00	41.00	20.50%	267.00	6.68%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
87.50	41.00	20.50%	257.00	6.43%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
88.00	41.00	20.50%	227.00	5.68%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
88.50	41.00	20.50%	227.00	5.68%	90.00	2.25%	9.20	32.50%
89.00	41.00	20.50%	237.00	5.93%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
89.50	42.00	21.00%	267.00	6.68%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
90.00	42.00	21.00%	287.00	7.18%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
90.50	42.00	21.00%	257.00	6.43%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
91.00	42.00	21.00%	297.00	7.43%	120.00	3.00%	9.20	32.50%
91.50	42.00	21.00%	297.00	7.43%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
92.00	42.00	21.00%	307.00	7.68%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
92.50	42.00	21.00%	307.00	7.68%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
93.00	42.00	21.00%	297.00	7.43%	90.00	2.25%	9.30	33.13%
93.50	42.00	21.00%	197.00	4.93%	60.00	1.50%	9.20	32.50%
94.00	42.00	21.00%	247.00	6.18%	60.00	1.50%	9.30	33.13%
94.50	43.00	21.50%	267.00	6.68%	80.00	2.00%	9.20	32.50%
95.00	43.00	21.50%	267.00	6.68%	90.00	2.25%	9.30	33.13%
95.50	43.00	21.50%	277.00	6.93%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
96.00	43.00	21.50%	287.00	7.18%	100.00	2.50%	9.20	32.50%
96.50	43.00	21.50%	257.00	6.43%	110.00	2.75%	9.30	33.13%
97.00	43.00	21.50%	247.00	6.18%	100.00	2.50%	9.30	33.13%
97.50	43.00	21.50%	287.00	7.18%	110.00	2.75%	9.20	32.50%
98.00	44.00	22.00%	297.00	7.43%	120.00	3.00%	9.30	33.13%
98.50	44.00	22.00%	177.00	4.43%	80.00	2.00%	9.30	33.13%

99.00	44.00	22.00%	167.00	4.18%	70.00	1.75%	9.20	32.50%
99.50	44.00	22.00%	147.00	3.68%	60.00	1.50%	9.30	33.13%
100.00	44.00	22.00%	137.00	3.43%	50.00	1.25%	9.30	33.13%
100.50	45.00	22.50%	117.00	2.93%	40.00	1.00%	9.20	32.50%
101.00	46.00	23.00%	107.00	2.68%	40.00	1.00%	9.30	33.13%
101.50	46.00	23.00%	97.00	2.43%	40.00	1.00%	9.30	33.13%
102.00	46.00	23.00%	87.00	2.18%	30.00	0.75%	9.20	32.50%
102.50	47.00	23.50%	87.00	2.18%	30.00	0.75%	9.30	33.13%
103.00	47.00	23.50%	77.00	1.93%	30.00	0.75%	9.30	33.13%
103.50	48.00	24.00%	67.00	1.68%	30.00	0.75%	9.20	32.50%
104.00	48.00	24.00%	77.00	1.93%	30.00	0.75%	9.30	33.13%
104.50	48.00	24.00%	67.00	1.68%	30.00	0.75%	9.30	33.13%
105.00	49.00	24.50%	67.00	1.68%	30.00	0.75%	9.20	32.50%
105.50	50.00	25.00%	67.00	1.68%	20.00	0.50%	9.30	33.13%
106.00	50.00	25.00%	67.00	1.68%	30.00	0.75%	9.30	33.13%
106.50	50.00	25.00%	57.00	1.43%	20.00	0.50%	9.20	32.50%
107.00	51.00	25.50%	57.00	1.43%	30.00	0.75%	9.30	33.13%
107.50	51.00	25.50%	47.00	1.18%	20.00	0.50%	9.30	33.13%
108.00	51.00	25.50%	57.00	1.43%	20.00	0.50%	9.20	32.50%
108.50	52.00	26.00%	57.00	1.43%	20.00	0.50%	9.30	33.13%
109.00	53.00	26.50%	57.00	1.43%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
109.50	53.00	26.50%	57.00	1.43%	20.00	0.50%	9.20	32.50%
110.00	54.00	27.00%	47.00	1.18%	20.00	0.50%	9.30	33.13%
110.50	54.00	27.00%	37.00	0.93%	20.00	0.50%	9.20	32.50%
111.00	54.00	27.00%	47.00	1.18%	20.00	0.50%	9.30	33.13%
111.50	55.00	27.50%	47.00	1.18%	20.00	0.50%	9.20	32.50%
112.00	55.00	27.50%	37.00	0.93%	20.00	0.50%	9.30	33.13%
112.50	56.00	28.00%	47.00	1.18%	20.00	0.50%	9.30	33.13%
113.00	57.00	28.50%	47.00	1.18%	20.00	0.50%	9.20	32.50%
113.50	57.00	28.50%	47.00	1.18%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
114.00	58.00	29.00%	47.00	1.18%	10.00	0.25%	9.20	32.50%
114.50	58.00	29.00%	47.00	1.18%	20.00	0.50%	9.30	33.13%
115.00	58.00	29.00%	37.00	0.93%	20.00	0.50%	9.20	32.50%
115.50	59.00	29.50%	47.00	1.18%	20.00	0.50%	9.30	33.13%
116.00	60.00	30.00%	37.00	0.93%	20.00	0.50%	9.20	32.50%
116.50	60.00	30.00%	47.00	1.18%	20.00	0.50%	9.30	33.13%
117.00	60.00	30.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
117.50	61.00	30.50%	47.00	1.18%	10.00	0.25%	9.20	32.50%
118.00	61.00	30.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
118.50	62.00	31.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
119.00	63.00	31.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
119.50	64.00	32.00%	37.00	0.93%	20.00	0.50%	9.20	32.50%
120.00	65.00	32.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
120.50	66.00	33.00%	47.00	1.18%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
121.00	66.00	33.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.20	32.50%

121.50	67.00	33.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
122.00	68.00	34.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
122.50	69.00	34.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.20	32.50%
123.00	70.00	35.00%	47.00	1.18%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
123.50	70.00	35.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
124.00	71.00	35.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.20	32.50%
124.50	72.00	36.00%	47.00	1.18%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
125.00	72.00	36.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
125.50	72.00	36.00%	47.00	1.18%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
126.00	73.00	36.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
126.50	74.00	37.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
127.00	74.00	37.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
127.50	75.00	37.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
128.00	75.00	37.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
128.50	76.00	38.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.20	32.50%
129.00	77.00	38.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
129.50	78.00	39.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
130.00	79.00	39.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.20	32.50%
130.50	79.00	39.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
131.00	80.00	40.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
131.50	80.00	40.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
132.00	81.00	40.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
132.50	81.00	40.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
133.00	82.00	41.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.20	32.50%
133.50	83.00	41.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
134.00	84.00	42.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
134.50	84.00	42.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.20	32.50%
135.00	85.00	42.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
135.50	86.00	43.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
136.00	87.00	43.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
136.50	87.00	43.50%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
137.00	88.00	44.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
137.50	89.00	44.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
138.00	90.00	45.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
138.50	91.00	45.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
139.00	92.00	46.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
139.50	93.00	46.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
140.00	94.00	47.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
140.50	95.00	47.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
141.00	96.00	48.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
141.50	97.00	48.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
142.00	98.00	49.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
142.50	99.00	49.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
143.00	100.00	50.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
143.50	101.00	50.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%



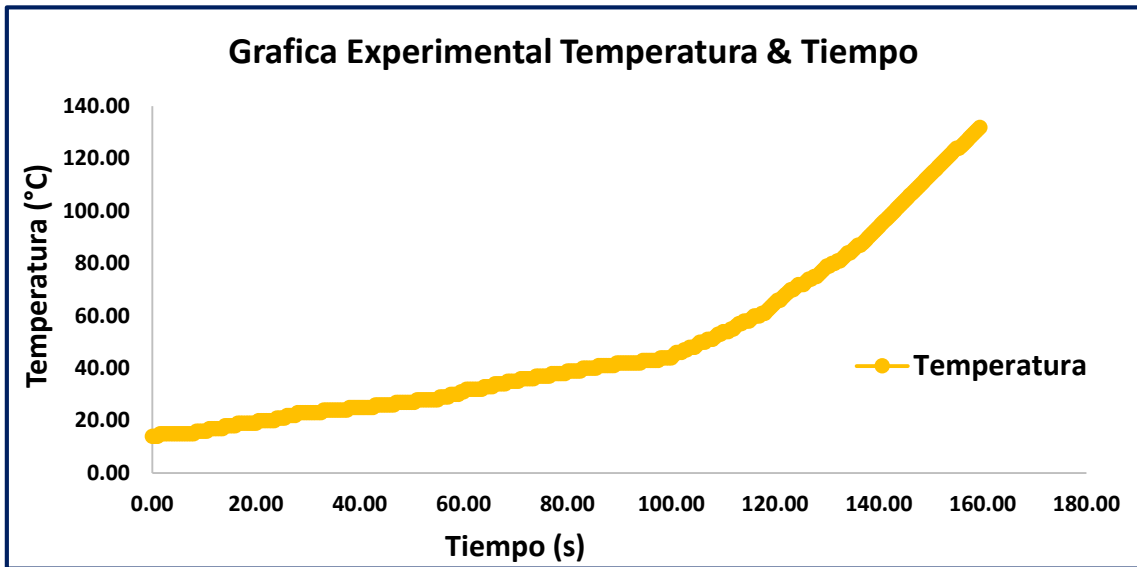
144.00	102.00	51.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
144.50	103.00	51.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
145.00	104.00	52.00%	37.00	0.93%	10.00	0.25%	9.30	33.13%
145.50	105.00	52.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
146.00	106.00	53.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
146.50	107.00	53.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
147.00	108.00	54.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
147.50	109.00	54.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
148.00	110.00	55.00%	37.00	0.93%	-10.00	-0.25%	9.30	33.13%
148.50	111.00	55.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
149.00	112.00	56.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
149.50	113.00	56.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
150.00	114.00	57.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
150.50	115.00	57.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
151.00	116.00	58.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
151.50	117.00	58.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
152.00	118.00	59.00%	37.00	0.93%	-10.00	-0.25%	9.20	32.50%
152.50	119.00	59.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
153.00	120.00	60.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
153.50	121.00	60.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
154.00	122.00	61.00%	47.00	1.18%	-10.00	-0.25%	9.30	33.13%
154.50	123.00	61.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
155.00	124.00	62.00%	47.00	1.18%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
155.50	124.00	62.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
156.00	125.00	62.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
156.50	126.00	63.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
157.00	127.00	63.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
157.50	128.00	64.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
158.00	129.00	64.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.20	32.50%
158.50	130.00	65.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
159.00	131.00	65.50%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%
159.50	132.00	66.00%	37.00	0.93%	0.00	0.00%	9.30	33.13%

Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.11.1.1. ADQUISICIÓN DE DATOS SENSOR DE TEMPERATURA

El sensor de temperatura, nos proporciona los datos registrados en el prototipo experimental, los datos obtenidos se muestran en la tabla 26, donde su gráfica en función del tiempo, se representa en la siguiente imagen.

Figura 3.35: Grafica Temperatura (14 a 132) °C

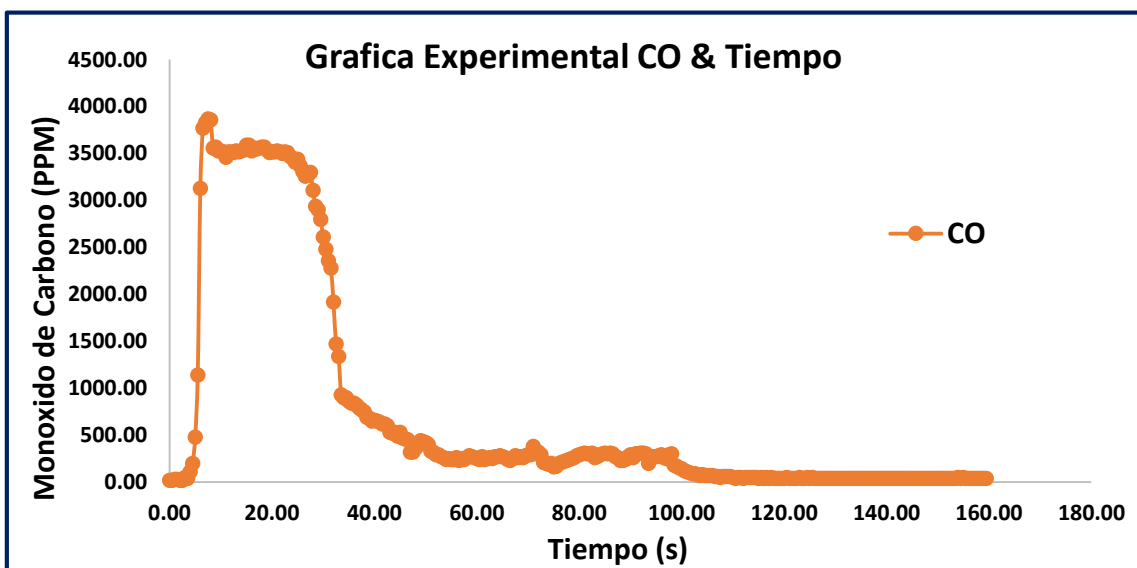


Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.11.1.2. ADQUISICIÓN DE DATOS SENSOR MQ-6 y MQ-9

Los sensores MQ – 6 y MQ – 9, nos permiten registrar y monitorear la contaminación del aire, en Partes por millón (PPM) del monóxido de carbono (CO) y metano (CH<sub>4</sub>), que produce la combustión, los datos registrados se muestran en la tabla N° 26.

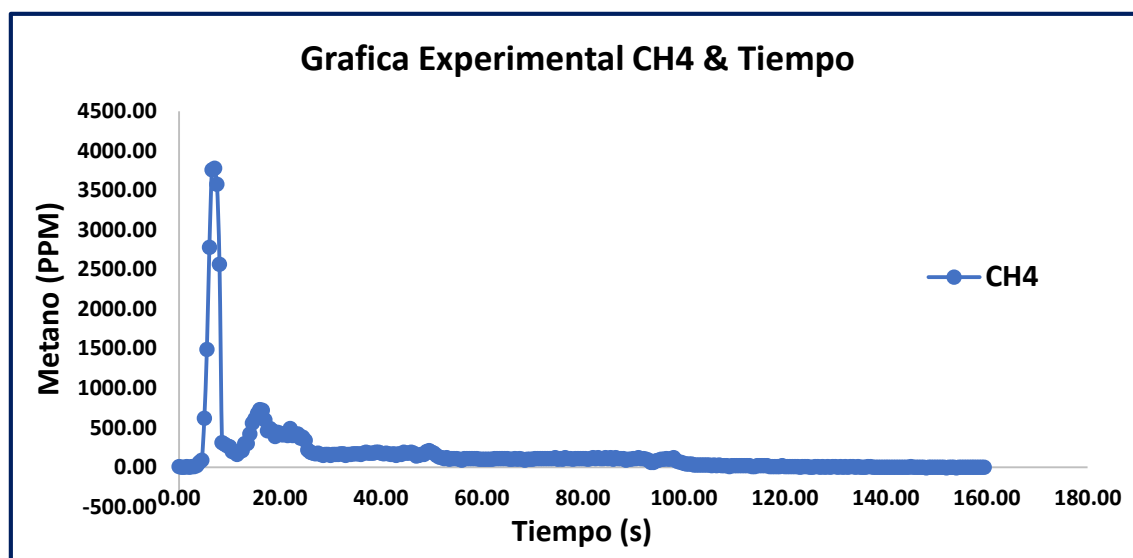
Figura 3.36: Grafica CO & Tiempo



Elaborado por el equipo de trabajo.



**Figura 3.37:** Grafica CH4 & Tiempo

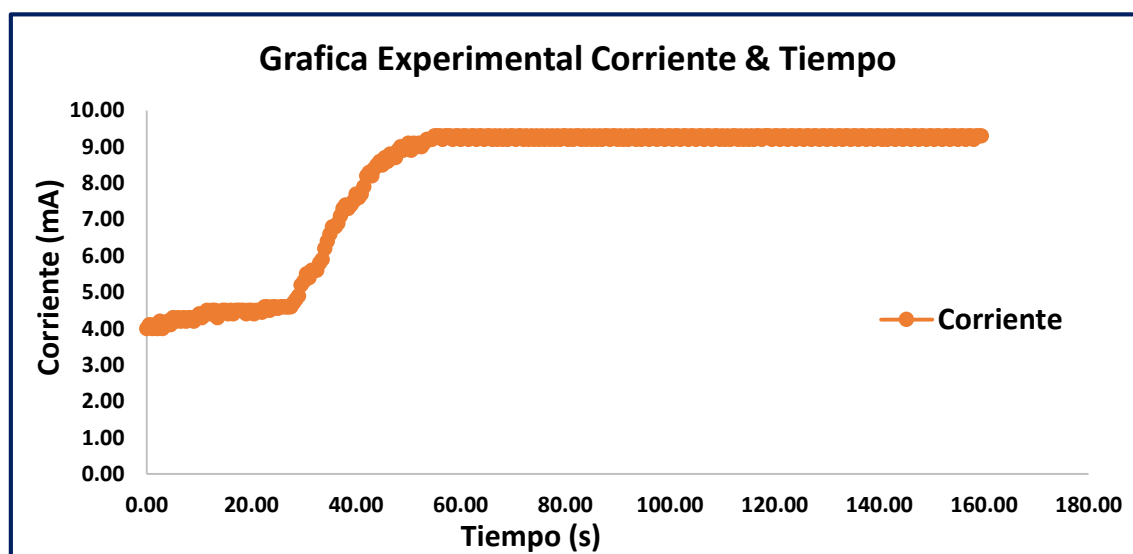


Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.11.1.3. CORRIENTE INYECTADO ELECTROVÁLVULA

La corriente de salida de la Defusificación se muestra en la tabla N° 26, donde esas mismas corrientes son entregadas a la electroválvula modular inteligente 02T. Estos datos se grafican para una mejor visualización tal como se muestra en la siguiente figura. De la misma manera los datos serán útiles para determinar el modelo matemático de la electroválvula modular.

**Figura 3.38:** Grafica Corriente & Tiempo



Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.11.1.4. DATOS ASIGNADOS AL INGRESO DE COMBUSTIBLE

Para el ingreso de combustible se regula por medio de la válvula de apertura y cierre manual donde se permitió ingresar una presión constante de 5 a 30 Psi, en cada prueba experimental, aplicando el método de Mandani se trabajó con presiones de 20 a 30 psi de combustible gaseoso, aplicando el método de Tsukamoto se trabajó con presiones de 5 a 20 psi.

### 3.12. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

En esta etapa se analizan los datos experimentales, los datos se procesan con el Software Microsoft Excel 2013 y Matlab R2016a, Para dicho fin se realiza el cálculo del modelamiento matemático para la electroválvula modular 02T y sensor de calidad de aire MQ – 9.

#### Modelo Matemático Electroválvula Modular 02T

Para obtener el modelo matemático de la electroválvula modular inteligente 02T se realizó un ensayo experimental, donde la máxima corriente es de 20 mA, a esta corriente la electroválvula permite la apertura de la válvula al 100%, y a media que se va disminuyendo la corriente, la válvula empezará a cerrarse hasta llegar a 0.00%. Los datos experimentales se muestran en la tabla N° 26.

Ganancia del actuador electroválvula.

$$K_p = 1.0056$$

Constante del tiempo.

$$T_p = 5.5101$$

Remplazando los valores calculados, el modelo matemático de primer orden, queda expresado de la siguiente manera.

$$G(s) = \frac{K_p}{T_p * s + 1} \quad G(s) = \frac{1.0056}{5.5101 * s + 1} \quad \dots(3.1)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace la ecuación N° 61, tenemos la siguiente ecuación en el dominio del tiempo.

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G(s)\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1.0056}{5.5101 * s + 1}\right\} \quad \dots(3.2)$$

La constante del tiempo del sistema se calcula por la siguiente ecuación matemática.

$$y(\tau) = K * \Delta U * [1 - e^{-1}] \quad y(\tau) = 8.671 \quad \dots(3.3)$$

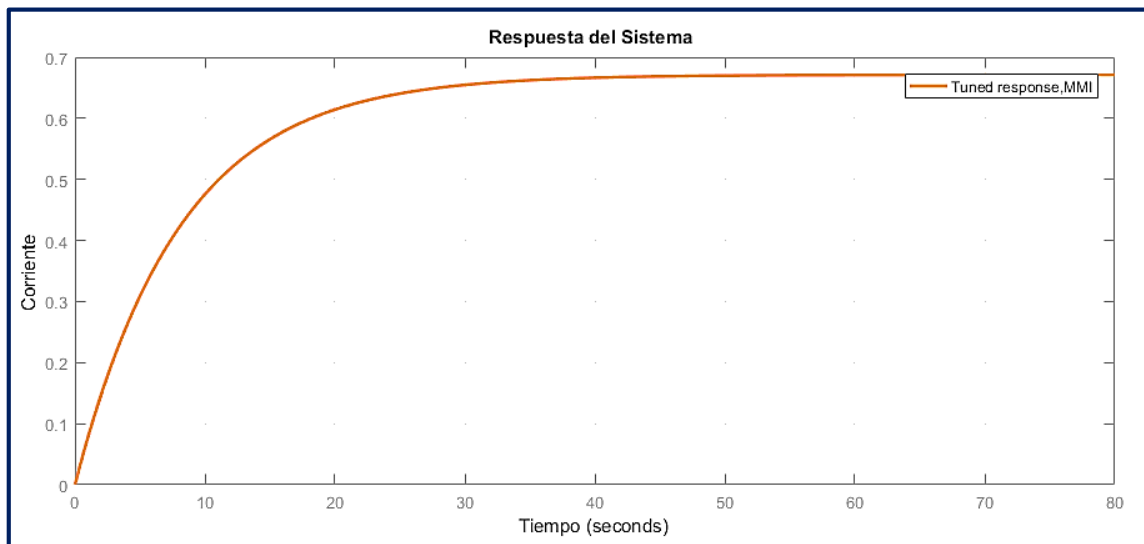
Ecuación resultante de la solución de la transformada inversa de Laplace para reemplazar los valores en el dominio del tiempo queda expresada por la siguiente ecuación.

$$y(t) = K * \Delta U * \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right] \quad \dots(3.4)$$

$$y(t) = 1.0056 * 8.671 * \left[1 - e^{-\frac{t}{5.5101}}\right] \quad \dots(3.5)$$

$$y(t) = 8.72 * [1 - e^{-0.1815*t}] \quad \dots(3.6)$$

**Figura 3.39:** Grafica de estabilidad de la Electroválvula 02T



Elaborado por el equipo de trabajo.

### Modelo Matemático Sensor MQ – 9

Para obtener el modelo matemático del sensor MQ – 9 se realizó un ensayo experimental, como valor referencial se marcó en 35 PPM. Donde la contaminación inicia

en un valor de 4000 PPM, seguidamente el sistema se estabiliza en 37 PPM. El modelo matemático obtenido es de primer orden.

Ganancia del sensor MQ – 9

$$K = \frac{37 - 4000}{35} = -113.2286$$

Constante del tiempo.

$$T_p = 22.1124$$

Remplazando los valores a la ecuación del primer orden se tiene la siguiente expresión matemática.

$$G(s) = \frac{K}{T_p * s + 1} \quad G(s) = \frac{-113.2286}{22.1124 * s + 1} \quad \dots(3.7)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace la ecuación N° 67, tenemos la siguiente ecuación en el dominio del tiempo.

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G(s)\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{-113.2286}{22.1124 * s + 1}\right\} \quad \dots(3.8)$$

La contante del tiempo del sistema se calcula por la siguiente ecuación matemática.

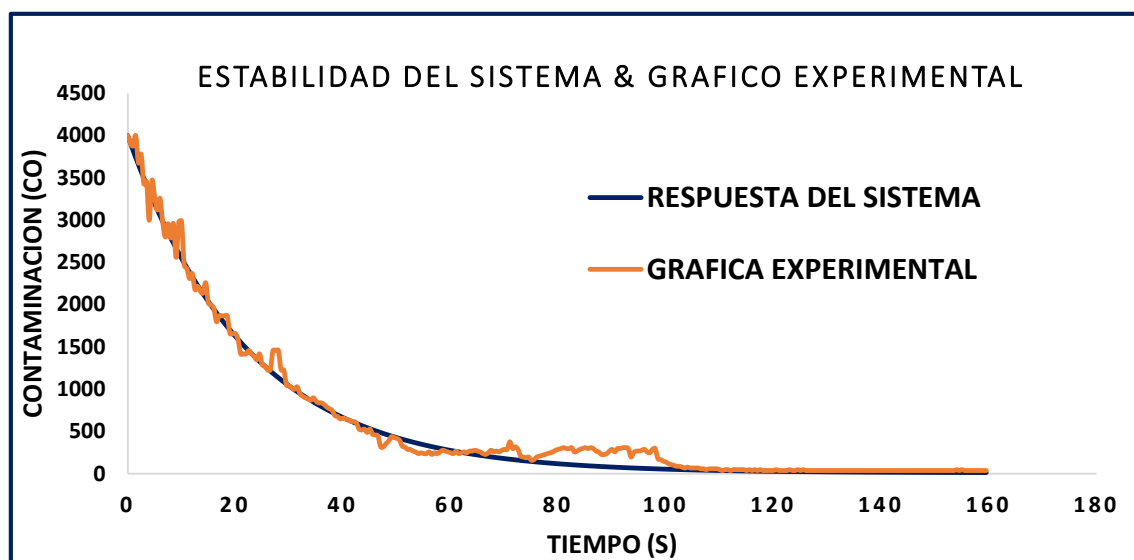
$$y(\tau) = K * \Delta U * [1 - e^{-1}] \quad y(\tau) = 22.1124 \quad \dots(3.9)$$

Resolviendo la ecuación N° 68 la transformada inversa de Laplace queda expresa por la ecuación matemática N° 70, para remplazar los valores en el dominio del tiempo queda expresada por la siguiente ecuación.

$$y(t) = K * \Delta U * \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right] \quad \dots(3.10)$$

$$y(t) = -113.2286 * 35 * \left[1 - e^{-\frac{t}{22.1124}}\right] \quad \dots(3.11)$$

$$y(t) = -3963.001 * [1 - e^{-0.04522*t}] \quad \dots(3.12)$$

**Figura 3.40:** Gráfica de estabilidad del sensor MQ - 9

Elaborado por el equipo de trabajo.

## CAPITULO IV

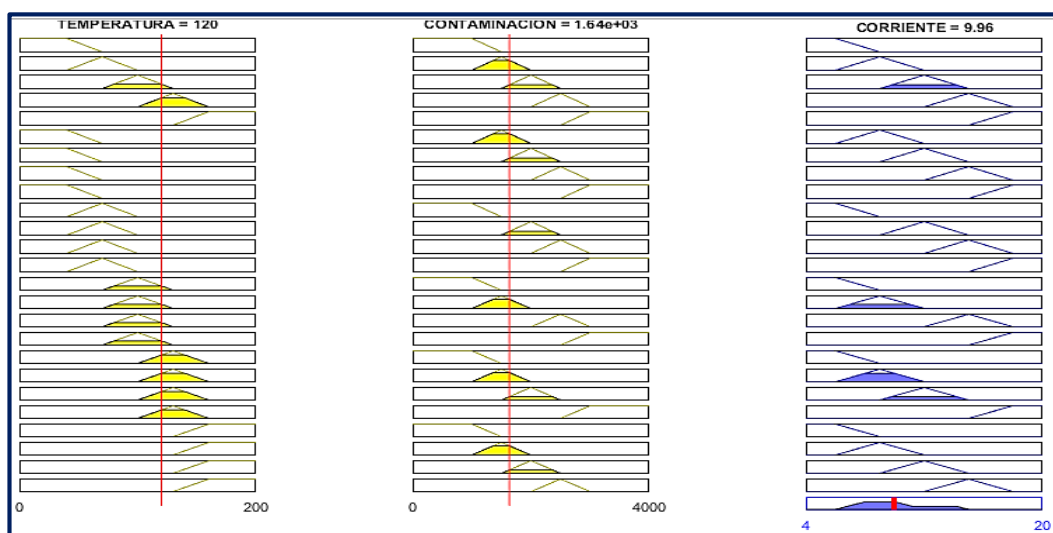
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente proyecto de investigación titulado “metodología para el diseño de un controlador difuso aplicado a hornos industriales de petróleo”. Se obtuvieron resultados que responde a los objetivos planteados.

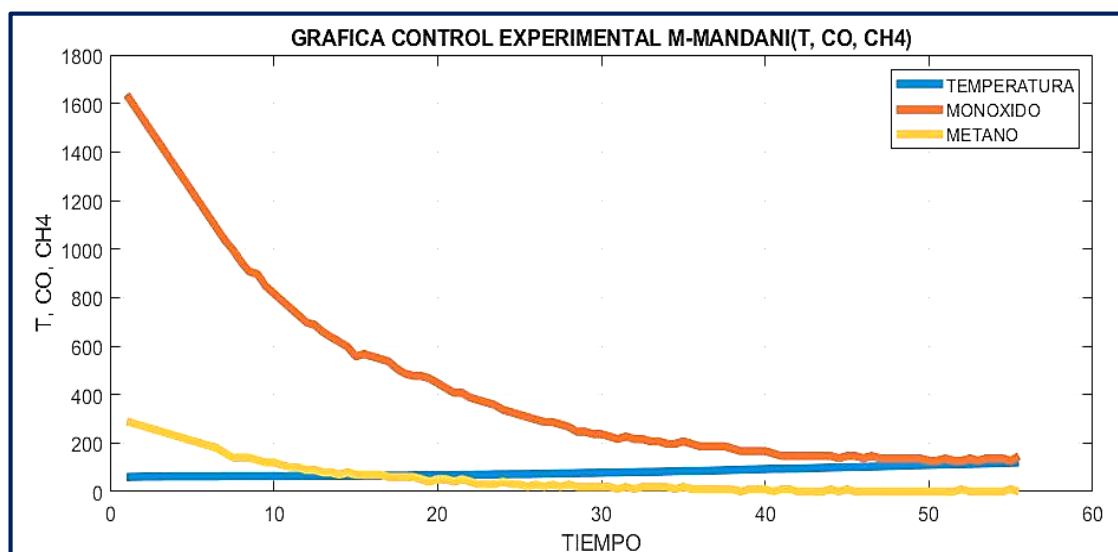
#### 4.1. Prueba experimental N° 01 Método de Mandani

Se realizó la prueba experimental con problema servo, para el cual se contó con cinco funciones de membresía y 25 reglas lingüísticas difusas, al cual se le asignó un valor del Set Point en 120 °C. Dando inicio en temperatura ambiental de 14 °C, a esta temperatura la emisión de gases contaminantes muestra un máximo valor de 1637.00 partes por millón de monóxido (CO) de carbono y 327.00 partes por millón de metano CH<sub>4</sub>. La mínima emisión de gases contaminantes cuando la temperatura es de 120 °C, muestra un valor de mínimo de 147.00 partes por millón de monóxido de carbono (CO) y 0.00 partes por millón de metano (CH<sub>4</sub>), finalmente la corriente resultante de la Defusificación cuando el sistema logra establecerse es de 9.96 mA, en un tiempo aproximado de 58 segundos.

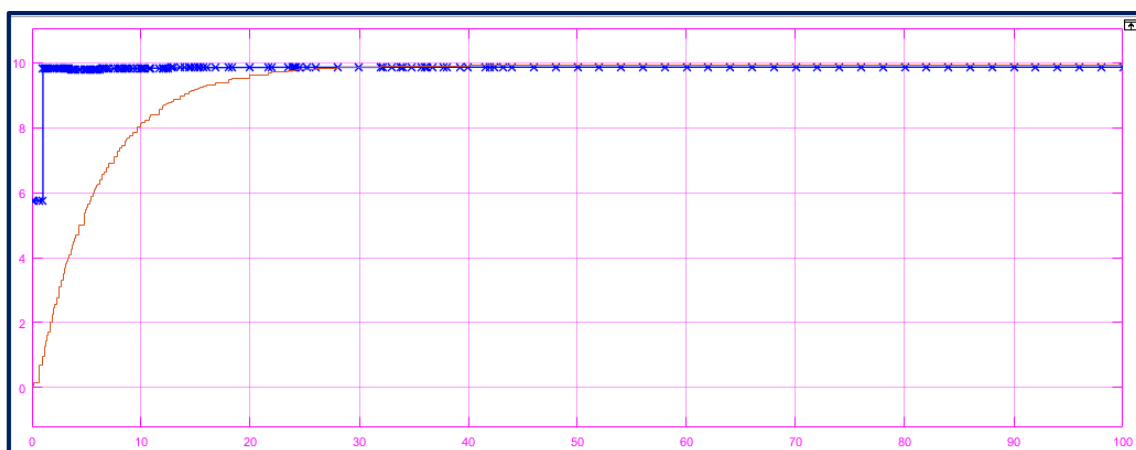
**Figura 4.1:** Fusificación Control Difuso a T.R de 120°C



Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 4.2:** Grafica experimental con problema servo

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 4.3:** Respuesta de la corriente Prueba N° 1

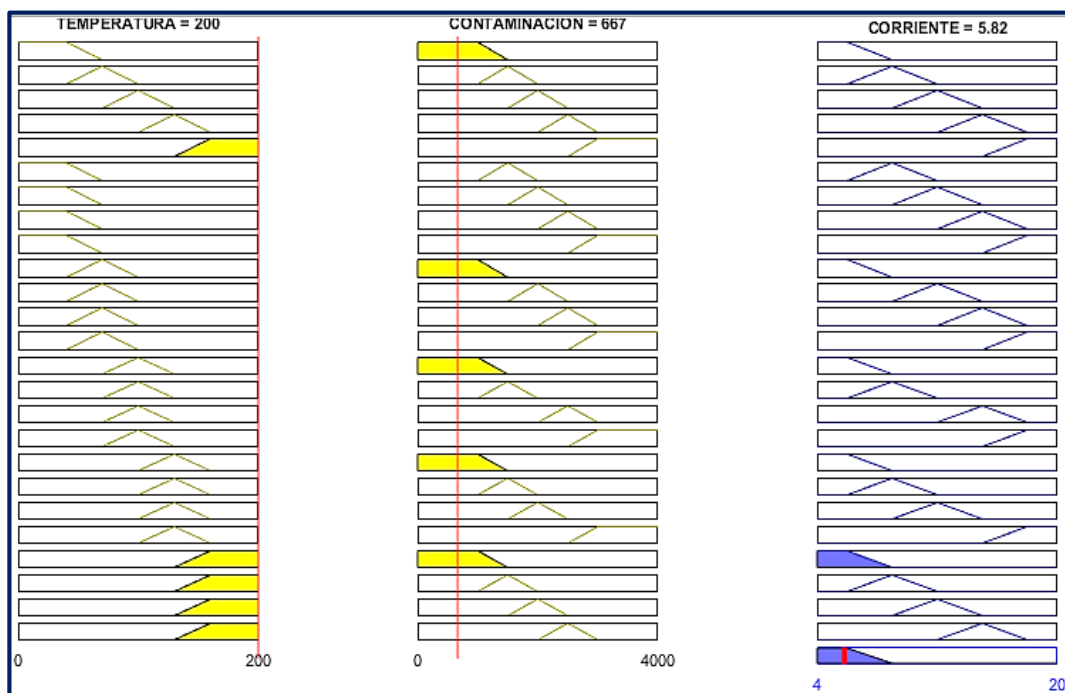
Elaborado por el equipo de trabajo.

## 4.2. Prueba experimental N° 02 Método de Mandani

Se realiza la prueba experimental con problema servo, para el cual se tiene cinco funciones de membresía y 25 reglas lingüísticas, al cual se le asigna un valor del Set Point de 100 °C, inicialmente la temperatura experimental es de 200°C, a esta temperatura la emisión de gases contaminantes muestra un valor de 97 PPM de monóxido de carbono y 0.00 partes por millón de metano, la corriente de Defusificación es de 18.10 mA. Cuando se alcanza la temperatura de 100 °C la emisión de gases contaminantes que se registra es

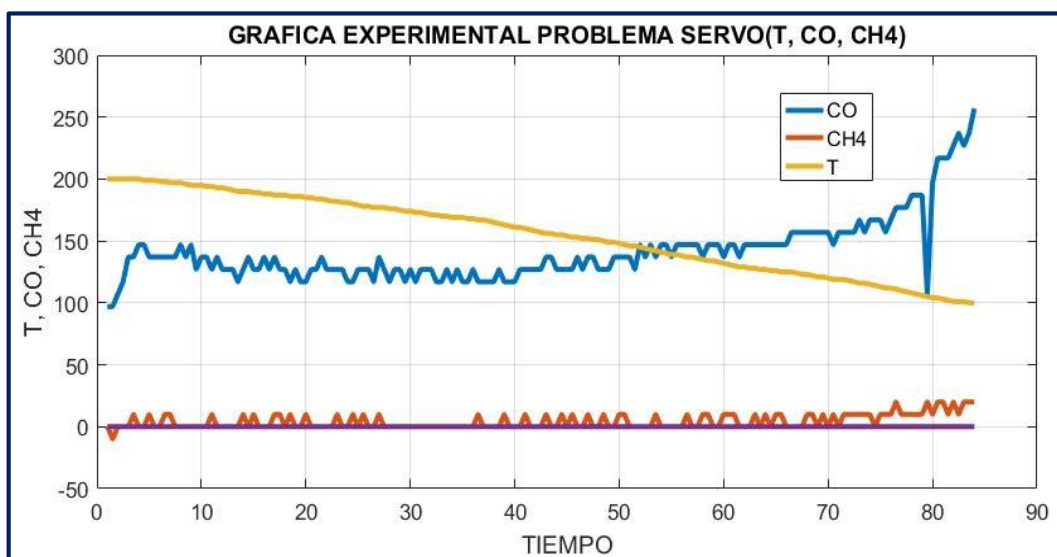
227 partes por millón de monóxido de carbono y 0.00 partes por millón de metano, la corriente resultante de la Defusificación cuando el sistema logra establecerse es de 5.82 mA, en un tiempo de aproximado de 90 segundos.

**Figura 4.4:** Fusificación del Control Difuso a T.R de 200°C



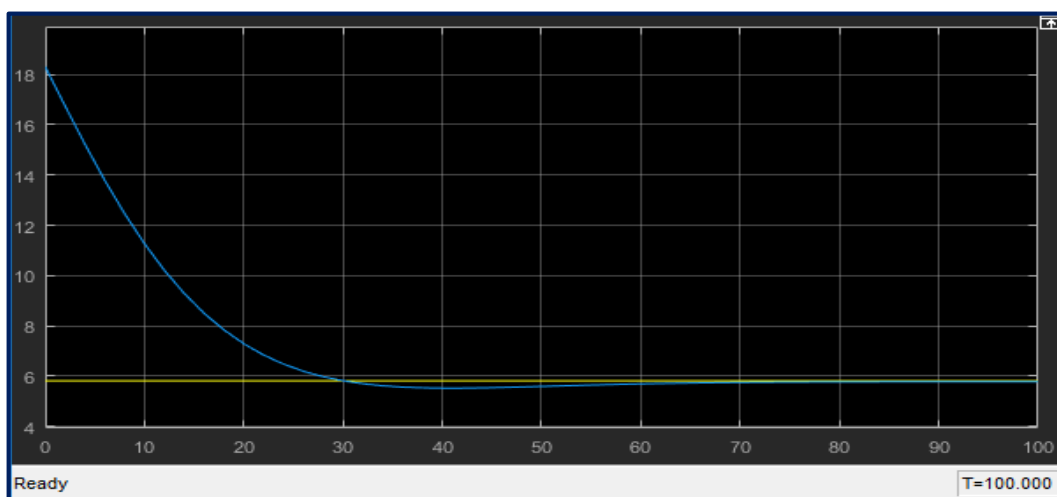
Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 4.5:** Grafica Experimental con Problema Servo P. N° 2



Elaborado por el equipo de trabajo.



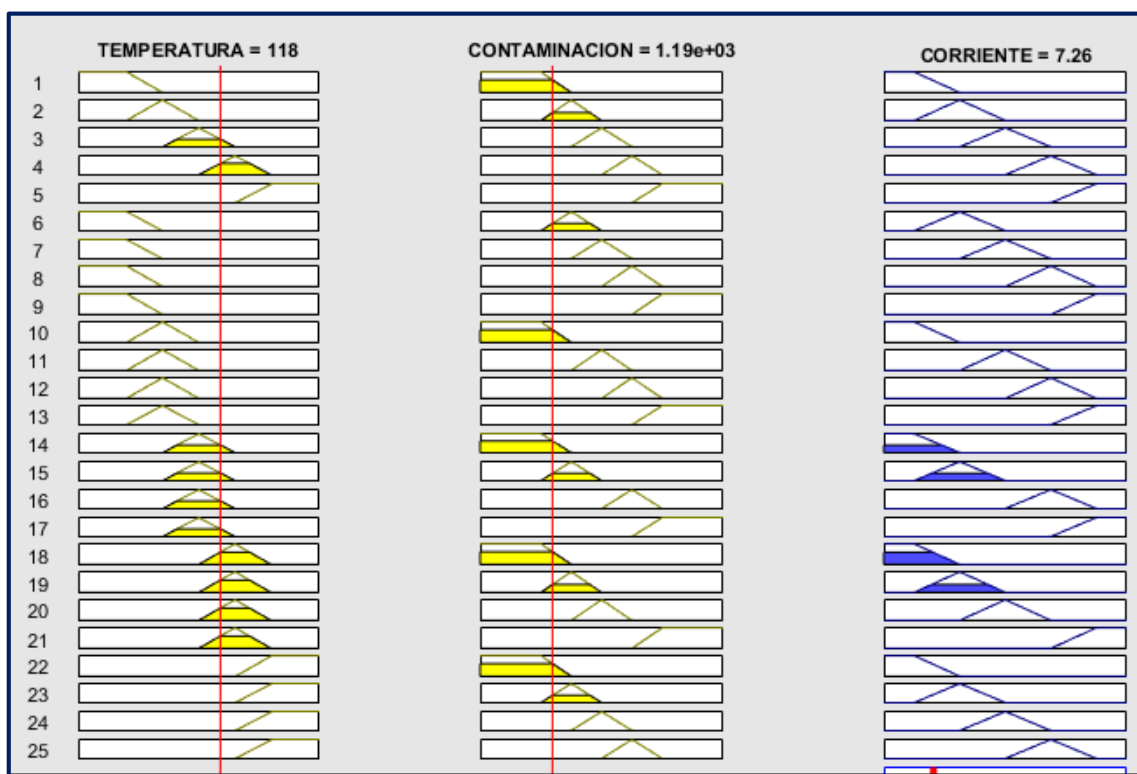
**Figura 4.6:** Respuesta de la Corriente Prueba N° 2

Elaborado por el equipo de trabajo.

### 4.3. Prueba experimental N° 03 Método de Mandani

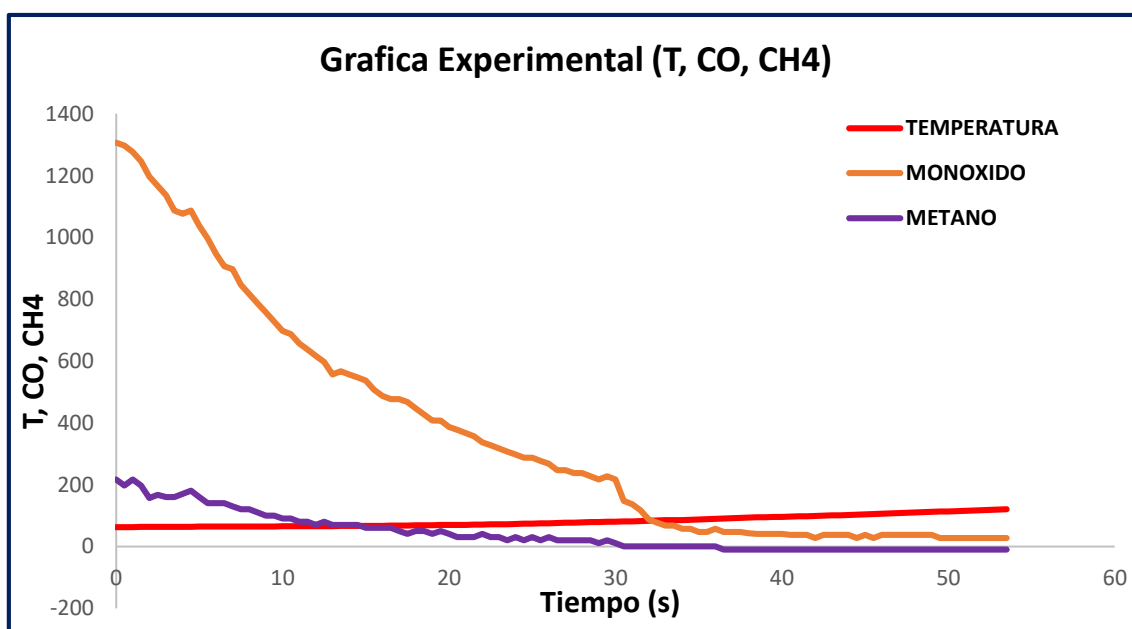
Se realizó la prueba experimental con problema regulado, para este fin se contó con cinco funciones de membresía y 25 reglas lingüísticas difusas, al cual se le asigna un valor del Set Point de 120°C, partiendo de la temperatura inicial de 62 °C la emisión de gases contaminantes muestra un máximo valor de 1307.00 partes por millón de monóxido de carbono (CO) 217.00 partes por millón de metano (CH<sub>4</sub>), la corriente resultante de la Defusificación cuando el sistema logra establecerse es de 7.26 mA, en un tiempo aproximado de 30 segundos, seguidamente después de este tiempo se aplica una corriente externa de 9.73 mA. El cual hace que el sistema tenga perturbación de entrada de aire, después de 25 segundos el sistema vuelve a estabilizarse, en ese instante del tiempo la emisión de gases contaminantes es de 27.00 partes por millón de monóxido de carbono (CO) y -10.00 partes por millón de metano (CH<sub>4</sub>).

**Figura 4.7:** Fusificación y Defusificación Control Fuzzy P. N° 03



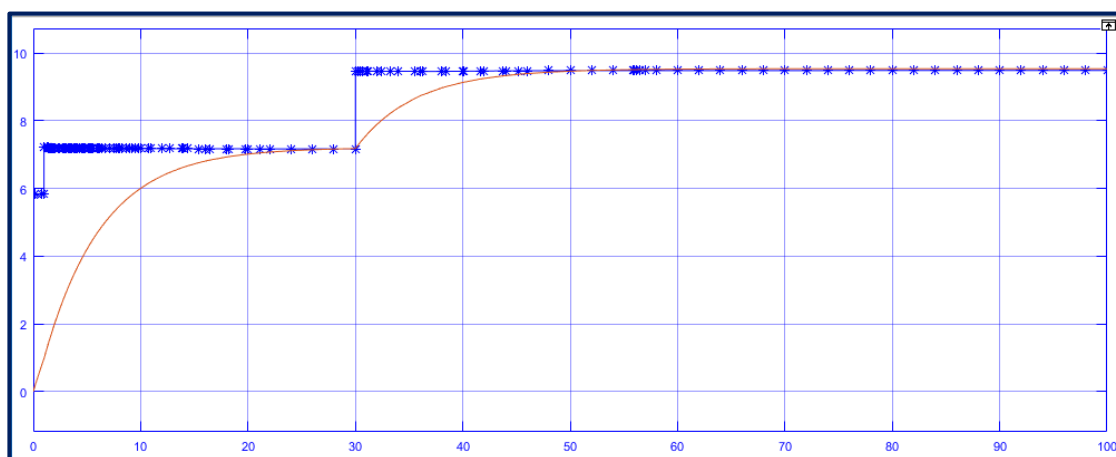
Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 4.8:** Grafica experimental con problema regulado - Prueba N° 3



Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 4.9:** Respuesta de la Corriente Prueba N° 3

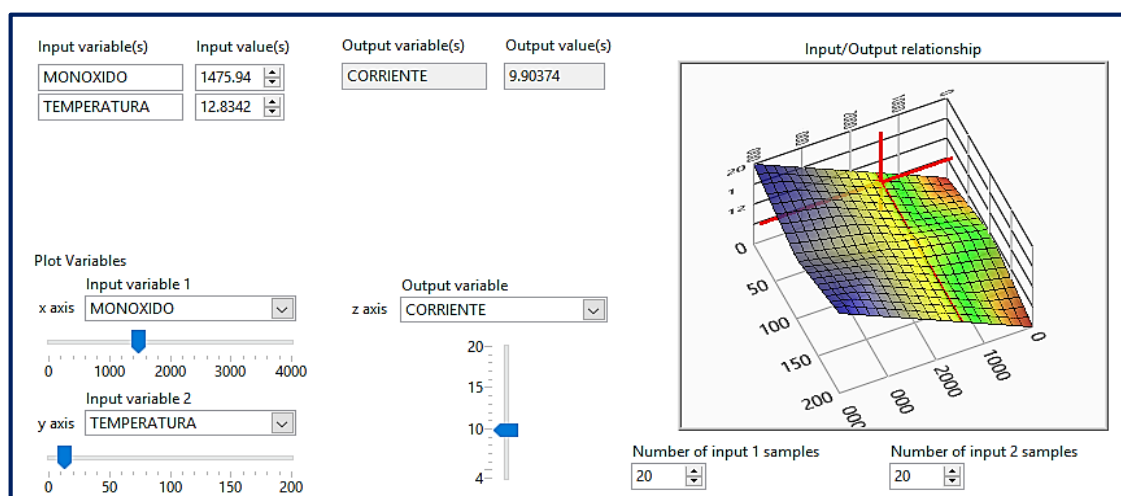


Elaborado por el equipo de trabajo.

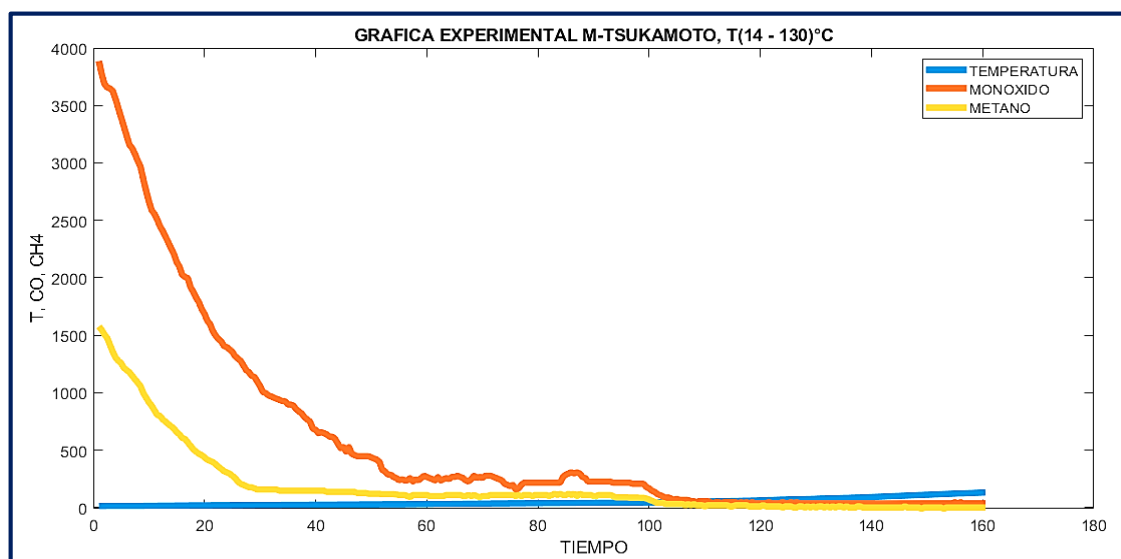
#### 4.4. Prueba N° 04 Método de Tsukamoto

Se realizó la prueba experimental con dos funciones de membresía y 4 reglas lingüísticas para el cual se le asigna un valor del Set Point de 130 °C, partiendo de la temperatura ambiental de 14 °C, a esta temperatura la emisión de gases contaminantes del prototipo experimental muestra un máximo valor de 3887 partes por millón (PPM) de monóxido de carbono y mínima de 37 partes por millón (PPM) de monóxido de carbono, la corriente resultante de la Defusificación cuando el sistema logra establecerse es de 9.90 mA. En un tiempo aproximado de 100 segundos.

**Figura 4.10:** Comportamiento del Control Difuso TSKM a T.R de 14 a 130°C



Elaborado por el equipo de trabajo.

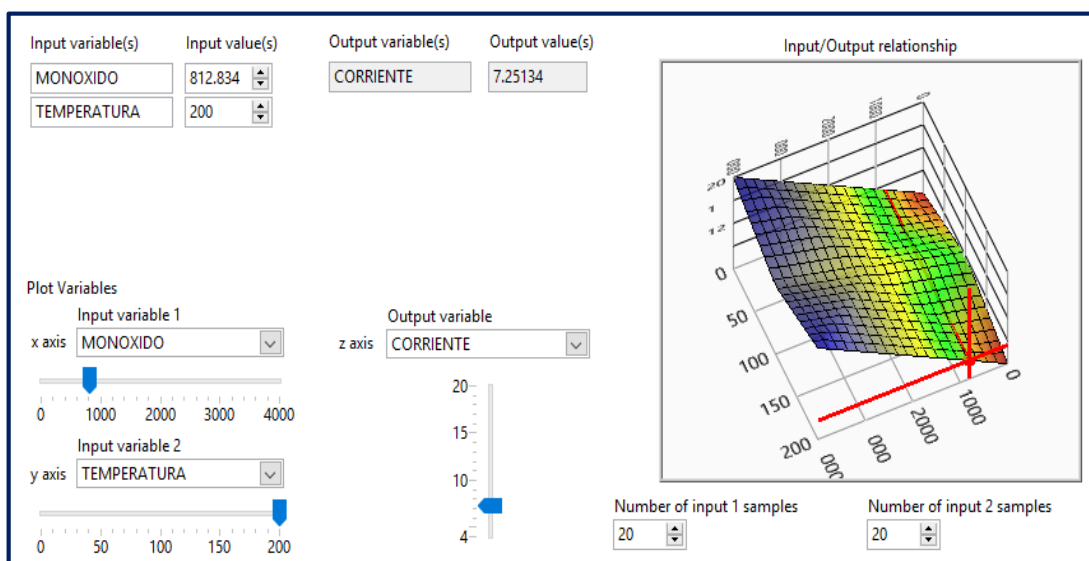
**Figura 4.11:** Grafica experimental T, CO, CH<sub>4</sub> a T.R de 14 a 130 °C

Elaborado por el equipo de trabajo.

#### 4.5. Prueba experimental N° 05 Método de Tsukamoto

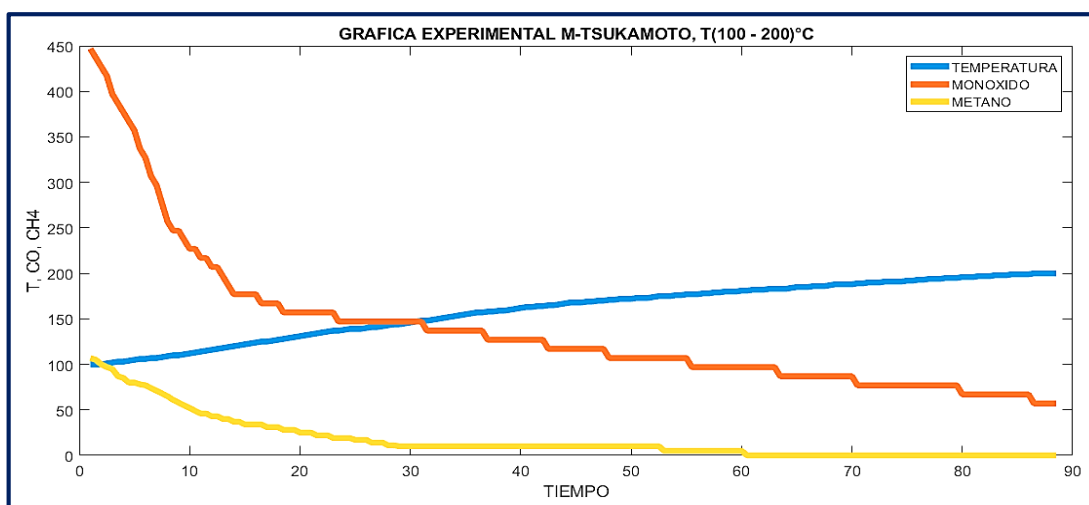
Se realizó la prueba experimental con dos funciones de membresía y cuatro reglas lingüísticas para el cual se asigna un valor del Set Point de 200 °C, como temperatura alta, partiendo de la temperatura inicial de 100 °C, la emisión de gases contaminantes muestra un máximo valor de 447.00 partes por millón de monóxido de carbono (CO) y 107.00 partes por millón de metano (CH<sub>4</sub>), cuando se alcanza la temperatura de 200 °C la emisión de gases contaminantes registra 57.00 partes por millón de monóxido de carbono (CO) y 0.00 partes por millón de metano (CH<sub>4</sub>), la corriente resultante de la Defusificación cuando el sistema logra establecerse es de 7.25 mA, en un tiempo aproximado de 98 segundos.

**Figura 4.12:** Comportamiento del Control Difuso TSKM a T.R de 100 a 200°C



Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura 4.13:** Grafica experimental T, CO, CH4 a T.R de 150 a 200 °C



Elaborado por el equipo de trabajo.

## CONCLUSIONES

**Primero:** El control difuso se puede aplicar en cualquier proceso o sistema a controlar donde permite evaluar una mayor cantidad de variables que deben ser medibles así como de entradas y salidas, además permite definir variables lingüísticas no numéricas que asemejan al conocimiento humano, también permite relacionar las variables de entradas y salidas, sin tener que entender todas las variables, permitiendo que el sistema pueda ser más confiable y estable que un control convencional.

**Segundo:** El diseño e implementación del controlador difuso en los Softwares Matlab y/o Labview, permiten su aplicación de manera sencilla, manipular las funciones de membresía, las reglas de control, la Fusificación y Defusificación, de una forma más adecuada. También simular el proceso de manera gráfica.

**Tercero:** Se cumplieron los objetivos de la investigación, para el control y monitoreo de la corriente, temperatura y contaminación, con un pequeño cambio en el combustible requerido, este cambio se realizó con la finalidad de que el combustible petróleo no es muy contaminante cuando se quema con el quemador directamente, debido a ellos se eligió un combustible sólido carburo, que reacciona al tener contacto con el agua y a la vez es más contaminante que el petróleo.

**Cuarto:** En las pruebas experimentales, aplicando los método de inferencia de Mandani y Tsukamoto, fueron satisfactorios porque permitió controlar la corriente, temperatura e emisiones contaminantes adecuadamente en menos tiempo, esto debido que cuando se tienes más de cinco términos lingüísticos el comportamiento del control difuso es más preciso y estable, que con tres términos lingüísticos. Aplicando la inferencia de Mandani: Con problema servo se logró reducir las emisiones contaminantes del monóxido de carbono en 147.00 partes por millón y metano en 0.00 partes millón, cuando la temperatura alcanza los 120 °C en un tiempo de aproximado de 58 segundos. Con

problema regulado se llegó a reducir las emisiones contaminantes en 27 partes por millón de monóxido de carbono y el metano en -10 partes por millón, a una temperatura de 120 °C en un tiempo aproximado de 56 segundos. Aplicando la inferencia de Tsukamoto, se logró reducir las emisiones contaminantes en 37.00 partes por millón de monóxido de carbono y 0.00 partes por millón de metano, a una temperatura de 130 °C, el resultado se logró en un tiempo de aproximado de 100 segundos.

## RECOMENDACIONES

**Primero:** Se recomienda a la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica eléctrica, que a futuro se realicen estudios o investigaciones más amplios, sobre el tema de controladores no convencionales, en particular al control difuso, ya que este mismo permite controlar un sistema de manera menos complicada, sin la necesidad de contar con el modelamiento matemático y tampoco requiere identificar la planta a controlar.

**Segundo:** se recomienda, más adelante la implementación del controlador difuso, en aquellas industrias o empresas que cuentan con hornos o calderos a combustión de petróleo, con la finalidad de generar más producción en menos tiempo y a su vez monitorear adecuadamente los parámetros físicos presentes en la planta. Donde el control difuso garantiza la producción y ahorrar el tiempo y energía.

**Tercero:** Cuando se realice las pruebas experimentales se debe tomar en cuenta la calibración de los sensores, tanto de temperatura y sensores de calidad de aire, donde el sensor MQ – 6 y MQ – 9 requieren la calibración al momento de realizar un nuevo procedimiento, ya que de esta forma los sensores registran datos más precisos y apropiados.

**Cuarto:** Se recomienda tener precaución, en no manipular el combustible sólido carburo directamente con la mano, ya que este mineral puede causar irritaciones en los ojos, así mismo genera un olor desagradable, que puede afectar al sistema respiratorio. También se recomienda que durante el funcionamiento del prototipo, evitar tocar el tubo de escape y chimenea que estos se encuentran calientes y pueden provocar quemaduras en la mano.



## REFERENCIAS

- Cablematic. (2016). Luz piloto LED de 22mm para paneles de control 220 VAC distribuido por CABLEMATIC. Retrieved October 22, 2019, from Cablematic website:  
[https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fi.ytimg.com%2Fvi%2FxyTUNNWd2aY%2Fmaxresdefault.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DxyTUNNWd2aY&docid=8KPTzVYtC8p\\_iM&tbnid=Xhbb1wVPFaUUJM%3A&vet=12ahUKEwje3vaeoLDIAhWQsJ4KHZgRCB84ZBAz](https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fi.ytimg.com%2Fvi%2FxyTUNNWd2aY%2Fmaxresdefault.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DxyTUNNWd2aY&docid=8KPTzVYtC8p_iM&tbnid=Xhbb1wVPFaUUJM%3A&vet=12ahUKEwje3vaeoLDIAhWQsJ4KHZgRCB84ZBAz)
- Camargo Castro, A. F., & Villamizar Rivera, E. J. (2008). *Control de Temperatura de un Horno Por Medio de Logica Difusa*.
- Condori Chahuara, S., & Serpa Quispe, J. (2017). Diseño del control de Temperatura para un Horno Industrial, mediante la Modulaci3n de ancho de pulso usando un PLC de gama alta. Retrieved from  
[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6103/Condori\\_Chahuara\\_Saul.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6103/Condori_Chahuara_Saul.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- CORDOVA MENDOZA, P. (2013). CONTROL DE PROCESOS.  
*INSTRUMENTACION Y CONTROL DE PROCESOS AMBIENTALES*, 1–24.
- Electronilab. (2019). Sensor de Temperatura RTD Platino – PT1000 – 3 hilos 1 metro - Electronilab. Retrieved October 23, 2019, from <https://electronilab.co> website:  
<https://electronilab.co/tienda/sensor-de-temperatura-rtd-platino-pt1000-3-hilos-1-metro/>
- Encinas Pajares, J. A., & Llobet Valero, E. (2011). Simulador de Temperatura de un Sensor RTD PT100 mediante MicroConvertidor ADuC812 e Interfaz de Usuario

- LabVIEW. *Trabajo de Grado, I*, 1–245.
- Hernández Agudelo, W. (2007). *Diseño y Construcción de un Sistema Automático de Control de Temperatura para un Horno Industrial*.
- Industrial, R. (2012). Terminales aisladas de Panduit. Retrieved October 22, 2019, from <http://www.reporteroindustrial.com/temas/Terminales-aisladas-de-vinilo+10086514>
- Jlim, C. (2013). La Plataforma del Conocimiento CTIN. Retrieved September 4, 2019, from Qué es un PLC website: <http://www.ctinmx.com/que-es-un-plc/>
- LLAMAS, L. (2019). Detector de gases con Arduino y la familia de sensores MQ. Retrieved October 22, 2019, from Ingeniería, informática y diseño website: <https://www.luisllamas.es/arduino-detector-gas-mq/>
- Logicbus. (2001). PLC Controlador Lógico Programable | PLC Expandibles Serie FBs | PLC Expandibles serie B1 y No Expandibles serie B1z | PLC con pantalla LCD integrada | Relevadores Programables | Controladores Compactos Distribuidos Programables | Controladores Programabl. Retrieved September 4, 2019, from PLC (Controlador Lógico Programable) website: <https://www.logicbus.com.mx/plc.php>
- MasVoltage. (2018). SIEMENS LOGO 12/24RC, Módulo lógico, Display, AL/E/S: 12/24V DC/Relés - MasVoltaje.com. Retrieved October 29, 2019, from <https://masvoltaje.com> website: <https://masvoltaje.com/home/1163-logo-12-24rc-modulo-logico-display-al-e-s-12-24v-dc-reles-6940408100091.html>
- NEMA. (2017). Programmable Controllers (PLC), Part 2: Equipment Requirements and Test. Retrieved September 4, 2019, from Programmable Logic Controllers (PLC)

- website: <https://www.nema.org/Standards/Pages/Programmable-Controllers-Part-2-Equipment-Requirements-and-Test.aspx>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (Quinta Edición; M. Martín-Romo, Ed.). Madrid (España).
- Paredes Pareja, W. O. (2010). Teoría de Combustión Autor: *Universidad Nacional Del Altiplano – Puno*, 1–28.
- Perez Alberto, M., Perez Hidalgo, A., & Perez Berenguer, E. (2008). “*INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE CONTROL*.” 1–69.
- Prieto, P. (2007). MONOGRAFICO: Lenguajes de programación - Principios básicos de PLC | Observatorio Tecnológico. Retrieved from Observatorio Tecnológico - Gobierno de España website:  
<http://recursostic.educacion.es/observatorio/web/gl/component/content/article/502-monografico-lenguajes-de-programacion?start=2>
- SRC. (1990). Tipos de SENSORES de Temperatura y sus diferencias | SRC. Retrieved September 4, 2019, from Especialistas en regulación y control de temperatura website: <https://srcsl.com/tipos-sensores-temperatura/>
- TCrystal. (2019). Tianjin T.Crystal actuator Co.,Ltd. Retrieved October 23, 2019, from <http://www.tcrystal.com> website:  
<http://www.tcrystal.com/a/standard/2018/0127/20.html>
- TECNOLOGIA. (2015). PLC LOGO de Siemens Teoria y Practicas. Retrieved October 29, 2019, from <https://www.areatecnologia.com/> website:  
<https://www.areatecnologia.com/electricidad/plc-logo.html>
- Valverde, K. N., & Castro, H. K. (2001). Controlador Difuso Para un Horno Electrico

Resistivo. *Congreso Nacional de Instrumentación (México), 2001.*, 2001.

Vilca Contreras, J. M., & Vidarte Chicchón, C. del R. (2010). *Diseño e Implementación de un Sistema de Control Difuso de Agua Temperada de Uso Doméstico.*

Zamora Gomes, E. (2015). *Lógica Difusa - Introducción al Curso y Aplicaciones -*

Hackeando Tec - YouTube. Retrieved September 4, 2019, from Curso de logica

Difusa website:

[https://www.youtube.com/watch?v=xLFNUo0mTZE&list=PLIyIZGa1sAZoWAeT\\_tL7zCv3wi1ISrBa0](https://www.youtube.com/watch?v=xLFNUo0mTZE&list=PLIyIZGa1sAZoWAeT_tL7zCv3wi1ISrBa0)

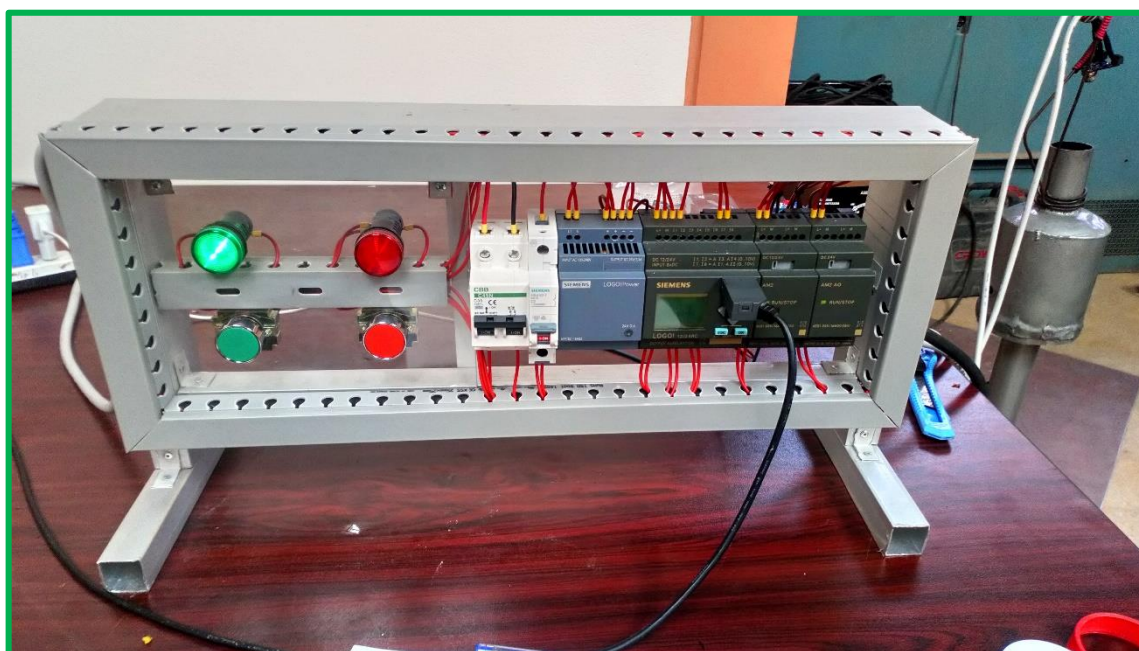
## ANEXOS

### ANEXO 1: ESTRUCTURA DE MÓDULO DE CONTROL



Elaborado por el equipo de trabajo.

### ANEXO 2: MÓDULO DE CONTROL IMPLEMENTADO



Elaborado por el equipo de trabajo.



**ANEXO 3: ENCENDIDO DEL QUEMADOR DE COMBUSTIBLE**



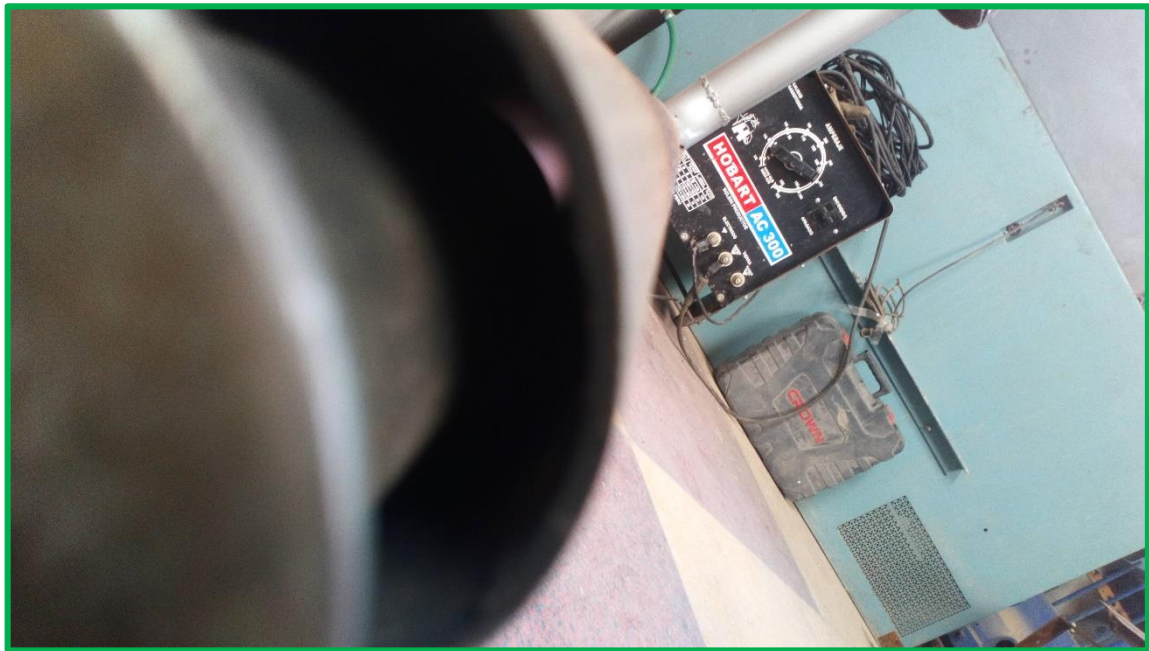
Elaborado por el equipo de trabajo.

**ANEXO 4: VISTA DEL QUEMADOR A FULL CONTAMINACIÓN**



Elaborado por el equipo de trabajo..

**ANEXO 5: VISTA DE LLAMA, MESCLA AIRE COMBUSTIBLE**



Elaborado por el equipo de trabajo.

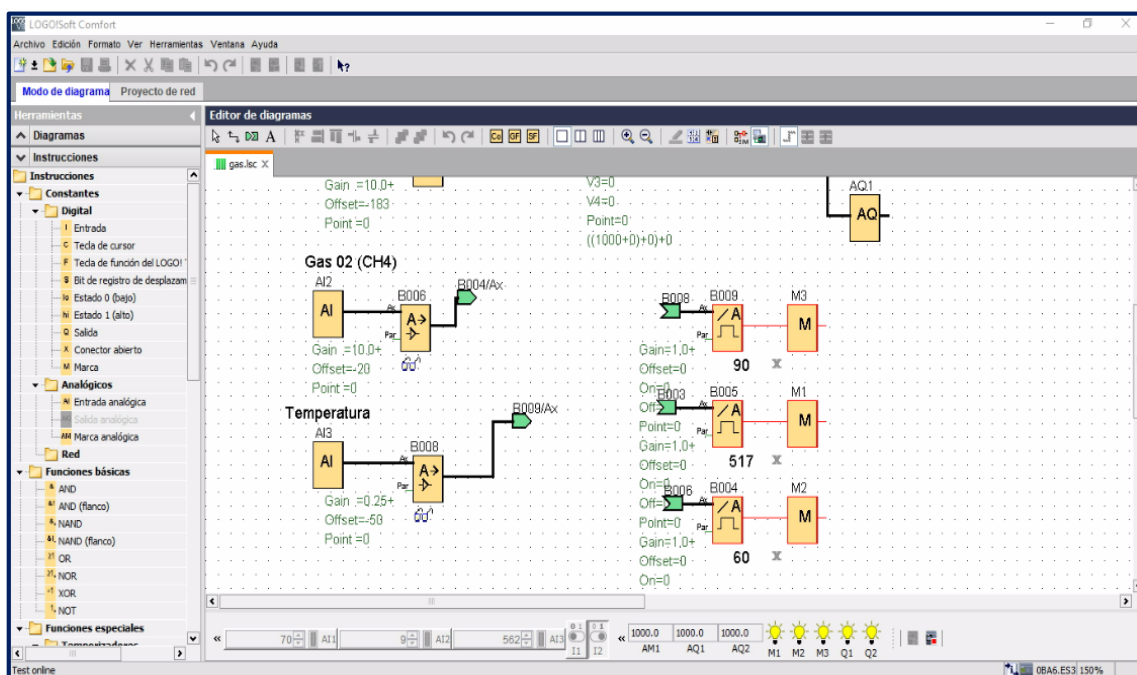
**ANEXO 6: BARÓMETRO DEL TANQUE DE COMBUSTIBLE**



Elaborado por el equipo de trabajo.

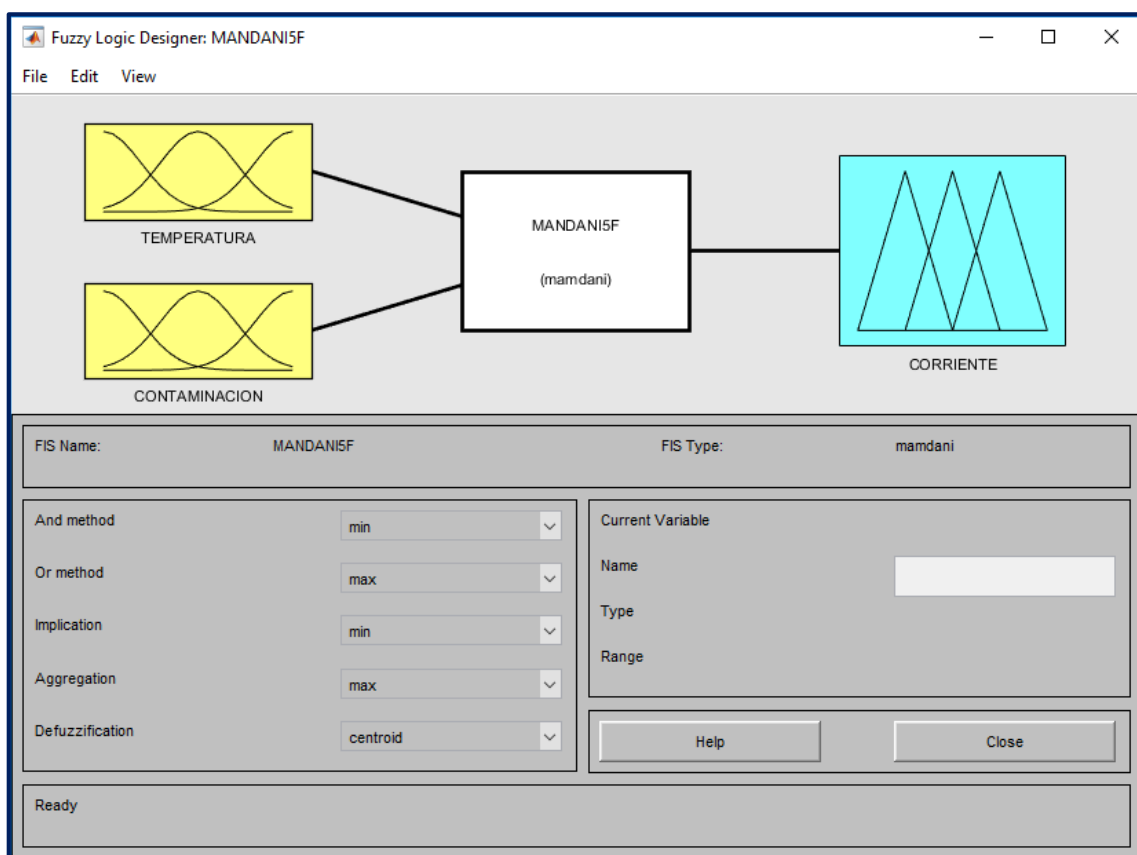


### ANEXO 7: PROGRAMACIÓN GRAFICA SOFTWARE LOGOSOFT



Elaborado por el equipo de trabajo.

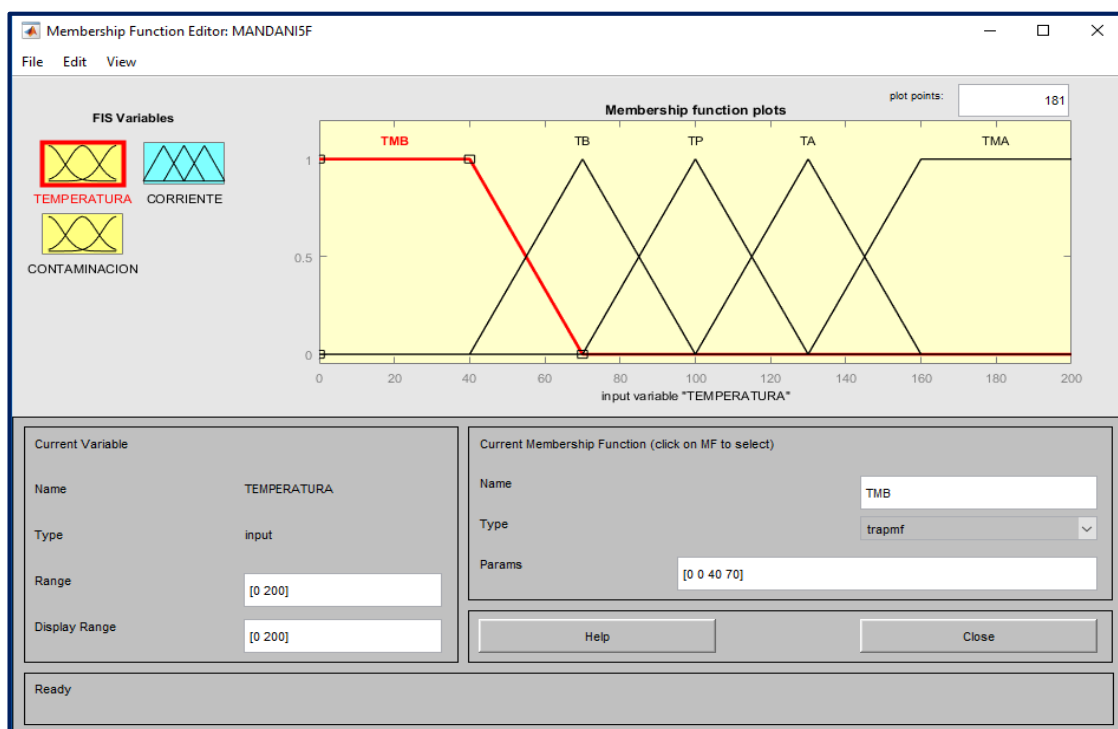
### ANEXO 8: VARIABLES LINGÜÍSTICAS DE ENTRADAS Y SALIDAS



Elaborado por el equipo de trabajo.

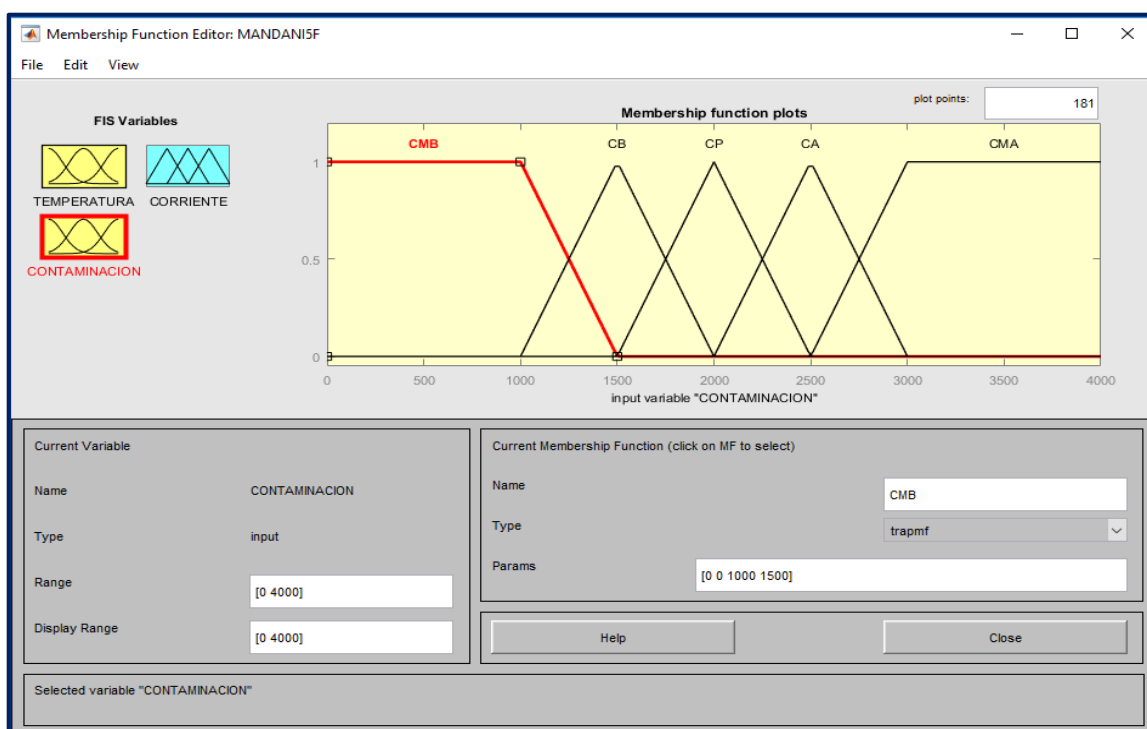


### ANEXO 9: FUNCIONES DE MEMBRESÍA VARIABLE TEMPERATURA



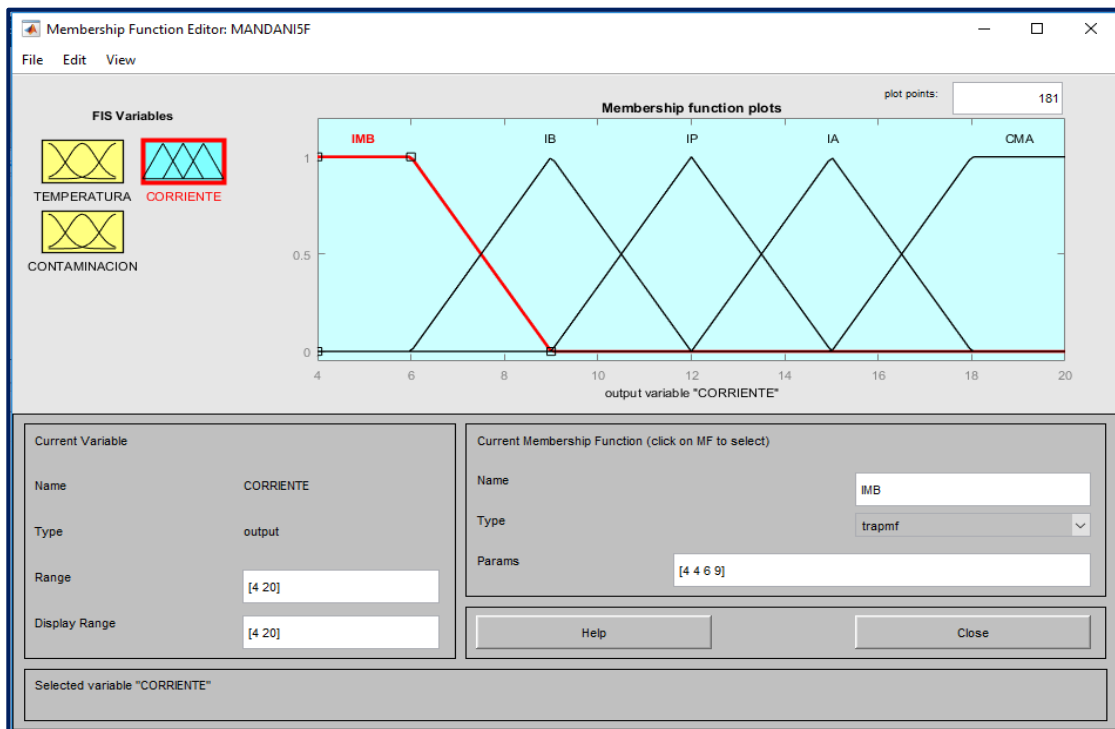
Elaborado por el equipo de trabajo.

### ANEXO 10: FUNCIONES DE MEMBRESÍA VARIABLE CONTAMINACIÓN



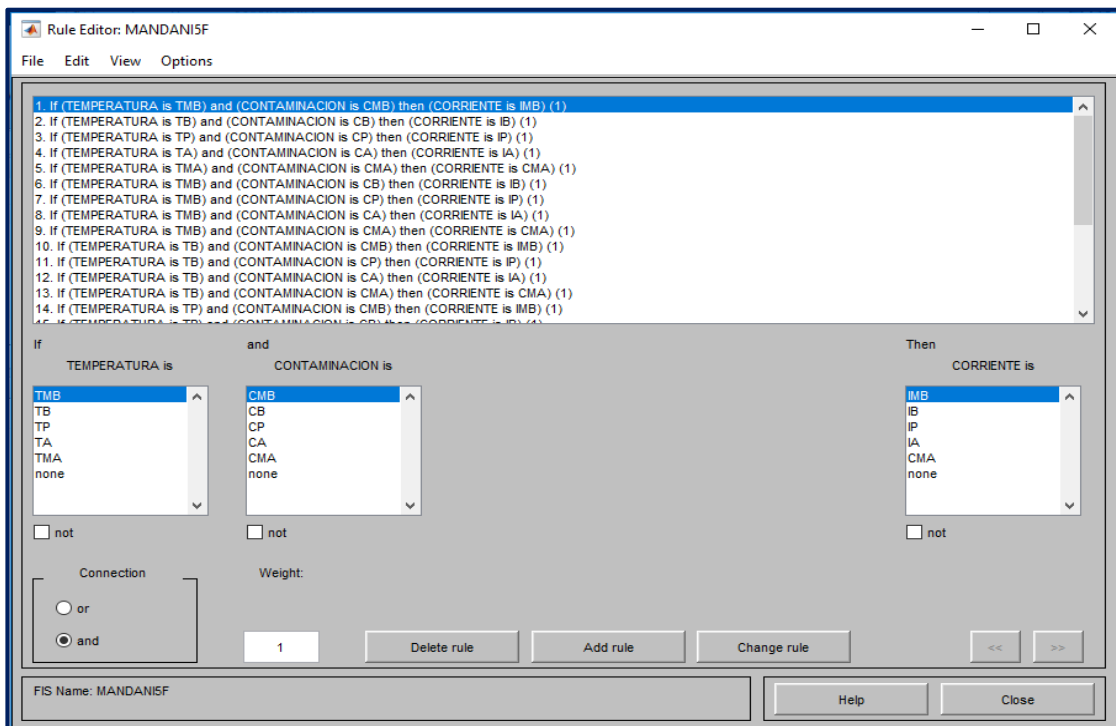
Elaborado por el equipo de trabajo.

**ANEXO 11: FUNCIONES DE MEMBRESÍA VARIABLE CORRIENTE**



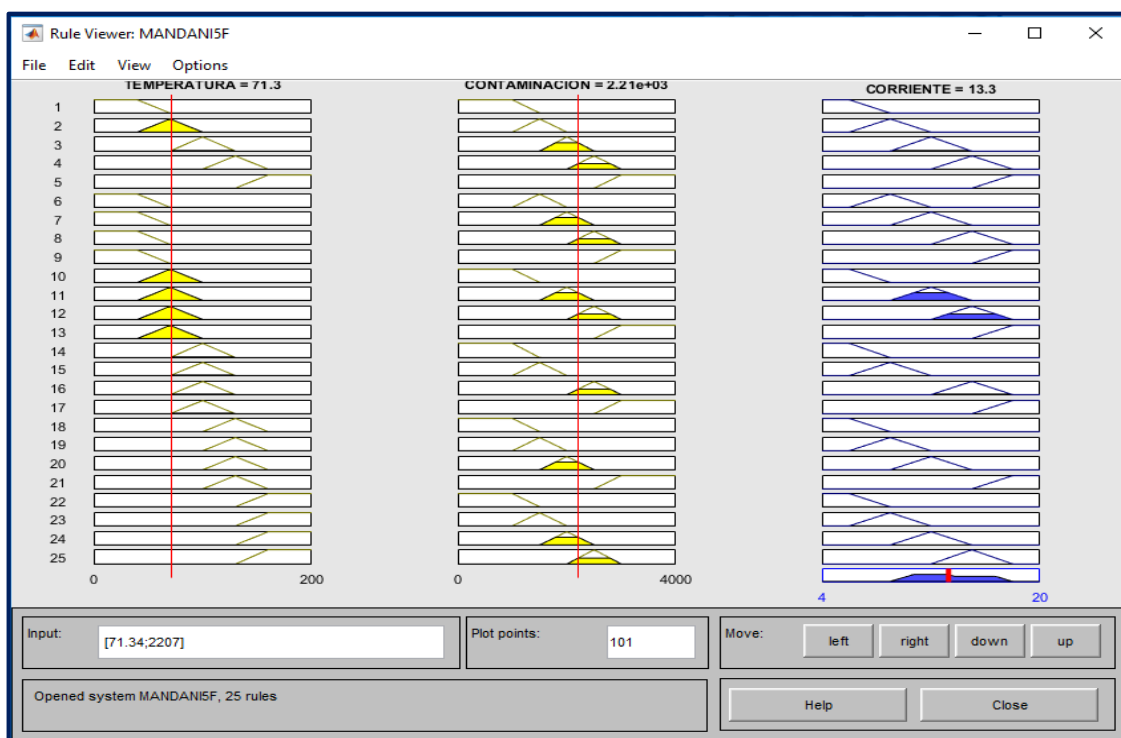
Elaborado por el equipo de trabajo.

**ANEXO 12: REGLAS DE CONTROL INFERENCIA DE MANDANI**



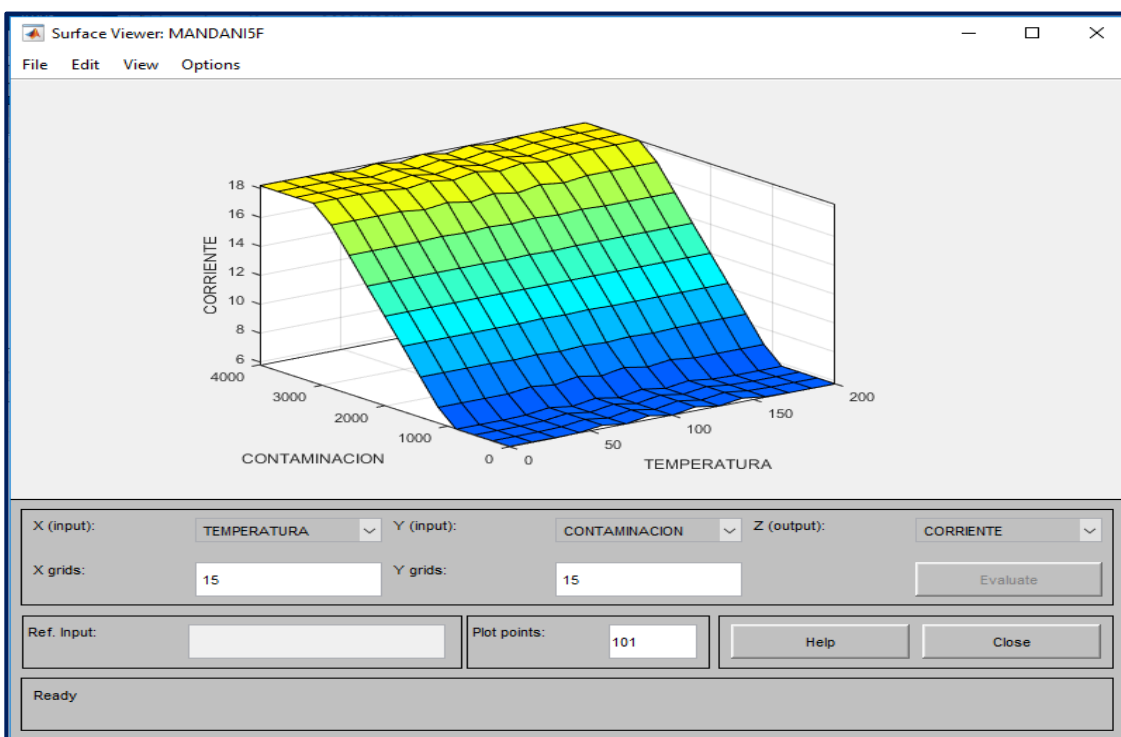
Elaborado por el equipo de trabajo.

**ANEXO 13: FUSIFICACIÓN Y DEFUSIFICACIÓN METODO MANDANI**



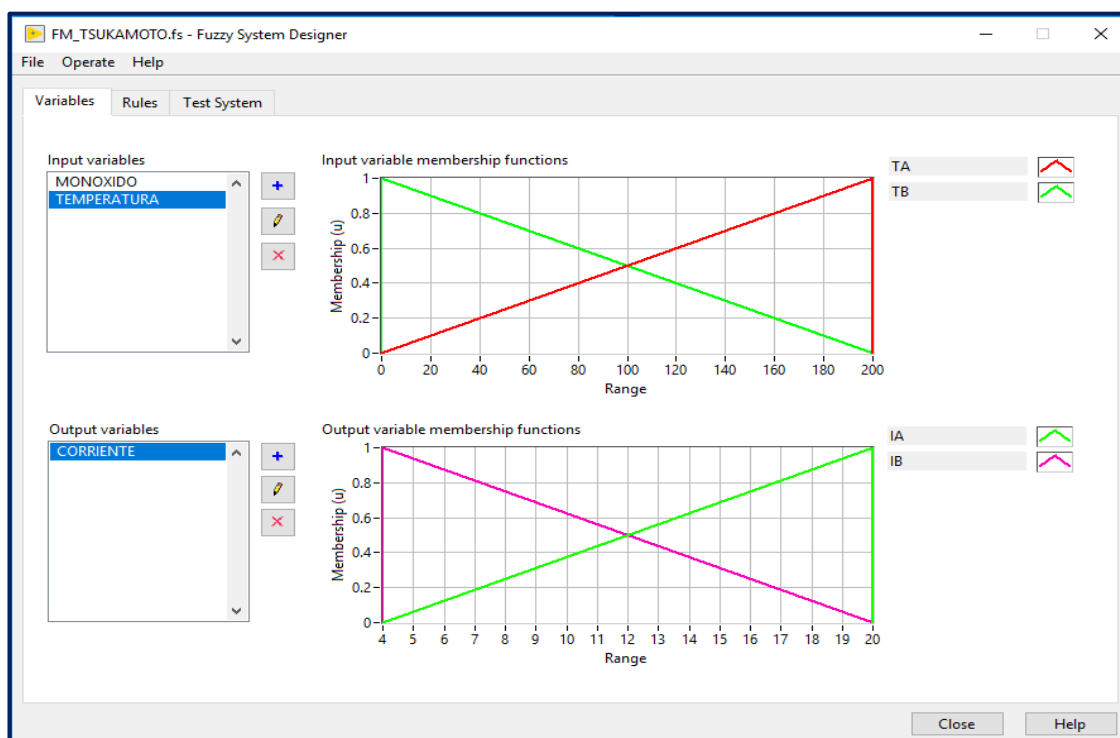
Elaborado por el equipo de trabajo.

**ANEXO 14: SUPERFICIE DE CONTROL MÉTODO DE MANDANI**



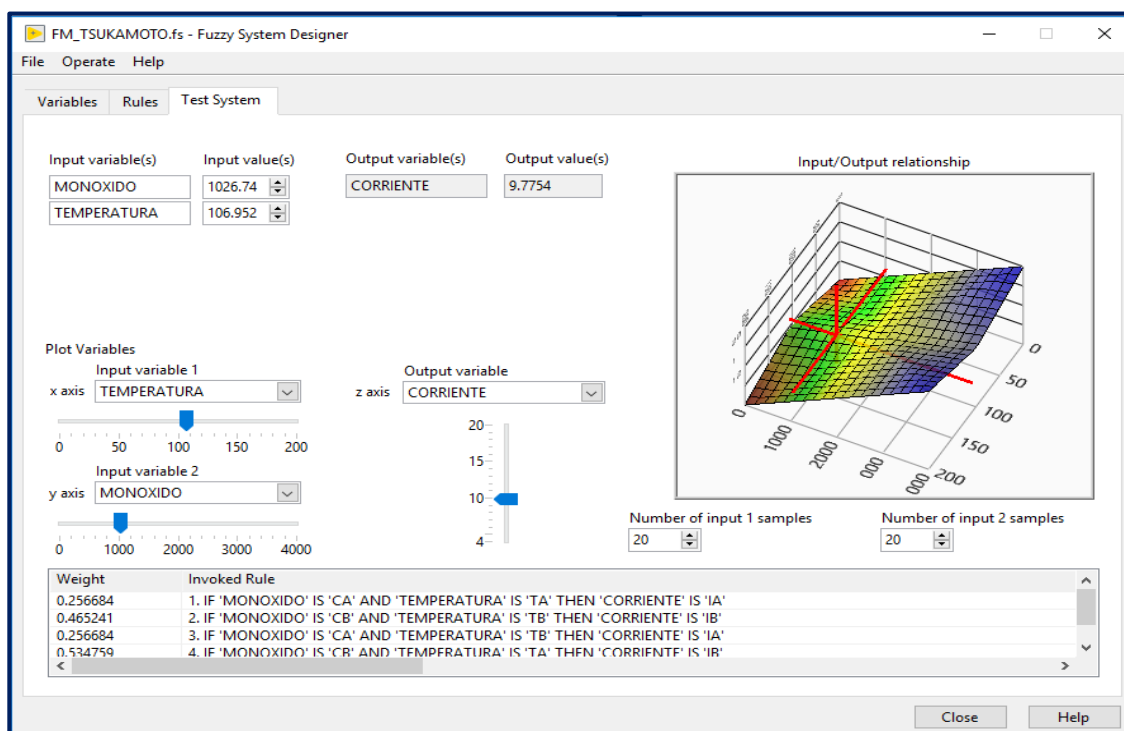
Elaborado por el equipo de trabajo.

**ANEXO 15: V. DE ENTRADA Y SALIDA MÉTODO TSUKAMOTO**



Elaborado por el equipo de trabajo..

**ANEXO 16: REGLAS Y SUPERFICIE DE CONTROL M. TSUKAMOTO**



Elaborado por el equipo de trabajo.

## ANEXO 17: DATOS EXPERIMENTALES M. MAMDANI

Adquisición de Datos Experimentales con el método de Mamdani							
Ítem	Tiempo	Temp	CO	CH4	Corriente	Angulo	P. Comb
1	1.00	100.00	667.00	480.00	16.11	75.70	5.00
2	1.50	101.00	657.00	470.00	16.10	75.60	5.00
3	2.00	102.00	647.00	460.00	16.08	75.50	5.00
4	2.50	103.00	637.00	450.00	16.06	75.40	5.00
5	3.00	104.00	627.00	440.00	16.05	75.30	5.00
6	3.50	105.00	617.00	430.00	16.03	75.20	5.00
7	4.00	106.00	607.00	420.00	16.02	75.10	5.00
8	4.50	107.00	597.00	410.00	15.98	74.90	5.00
9	5.00	108.00	587.00	340.00	15.95	74.70	5.00
10	5.50	109.00	577.00	330.00	15.92	74.50	5.00
11	6.00	110.00	567.00	310.00	15.89	74.30	5.00
12	6.50	111.00	557.00	280.00	15.86	74.10	5.00
13	7.00	112.00	547.00	240.00	15.82	73.90	5.00
14	7.50	113.00	537.00	210.00	15.79	73.70	5.00
15	8.00	114.00	527.00	210.00	15.76	73.50	5.00
16	8.50	115.00	517.00	200.00	15.73	73.30	5.00
17	9.00	116.00	507.00	200.00	15.70	73.10	5.00
18	9.50	116.00	497.00	190.00	15.66	72.90	5.00
19	10.00	117.00	487.00	170.00	15.65	72.80	5.00
20	10.50	117.00	477.00	160.00	15.60	72.50	5.00
21	11.00	117.00	467.00	160.00	15.57	72.30	5.00
22	11.50	117.00	457.00	160.00	15.54	72.10	5.00
23	12.00	117.00	447.00	150.00	15.50	71.90	5.00
24	12.50	118.00	437.00	140.00	15.47	71.70	5.00
25	13.00	118.00	427.00	140.00	15.44	71.50	5.00
26	13.50	118.00	417.00	130.00	15.41	71.30	5.00
27	14.00	118.00	407.00	120.00	15.38	71.10	5.00
28	14.50	118.00	397.00	100.00	15.35	70.91	5.00
29	15.00	119.00	387.00	50.00	15.33	70.82	5.00
30	15.50	119.00	377.00	60.00	15.32	70.73	5.00
31	16.00	119.00	357.00	40.00	15.30	70.64	5.00
32	16.50	119.00	347.00	40.00	15.29	70.55	5.00
33	17.00	120.00	337.00	50.00	15.27	70.46	5.00
34	17.50	120.00	327.00	50.00	15.25	70.32	5.00
35	18.00	121.00	317.00	40.00	15.25	70.30	5.00
36	18.50	121.00	317.00	50.00	15.23	70.21	5.00
37	19.00	121.00	317.00	30.00	15.21	70.04	5.00
38	19.50	121.00	307.00	30.00	15.18	69.90	5.00
39	20.00	122.00	297.00	40.00	15.17	69.80	5.00

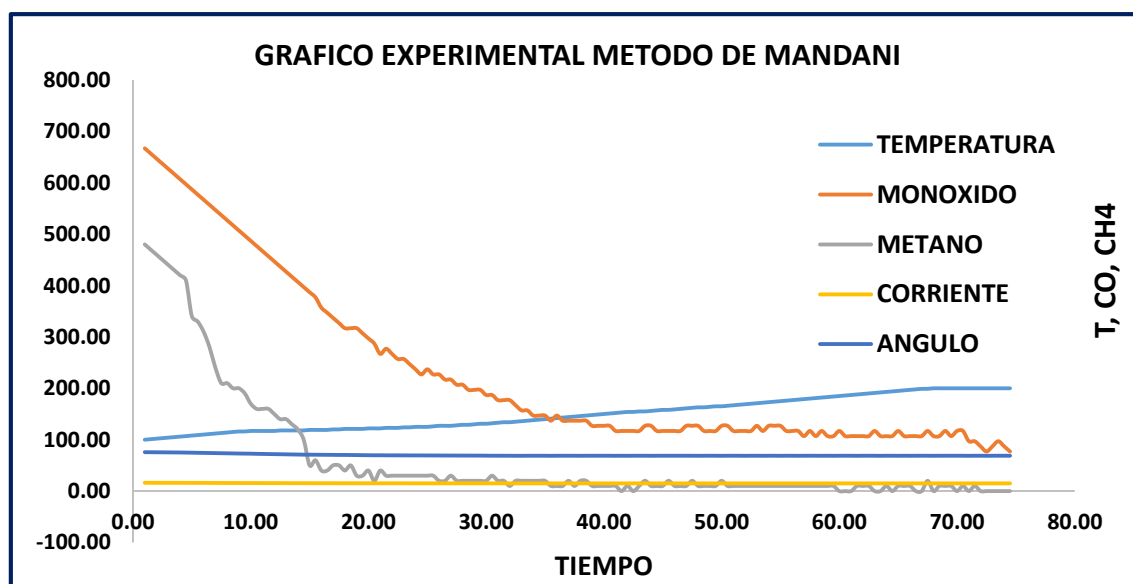
40	20.50	122.00	287.00	20.00	15.15	69.70	5.00
41	21.00	122.00	267.00	40.00	15.15	69.70	5.00
42	21.50	123.00	277.00	30.00	15.14	69.60	5.00
43	22.00	123.00	267.00	30.00	15.13	69.55	5.00
44	22.50	123.00	257.00	30.00	15.12	69.52	5.00
45	23.00	124.00	257.00	30.00	15.12	69.48	5.00
46	23.50	124.00	247.00	30.00	15.11	69.43	5.00
47	24.00	125.00	237.00	30.00	15.10	69.40	5.00
48	24.50	125.00	227.00	30.00	15.10	69.37	5.00
49	25.00	125.00	237.00	30.00	15.09	69.33	5.00
50	25.50	126.00	227.00	30.00	15.09	69.29	5.00
51	26.00	127.00	227.00	20.00	15.08	69.25	5.00
52	26.50	127.00	217.00	20.00	15.07	69.20	5.00
53	27.00	127.00	217.00	30.00	15.07	69.17	5.00
54	27.50	128.00	207.00	20.00	15.06	69.14	5.00
55	28.00	129.00	207.00	20.00	15.06	69.10	5.00
56	28.50	129.00	197.00	20.00	15.05	69.08	5.00
57	29.00	130.00	197.00	20.00	15.05	69.04	5.00
58	29.50	131.00	197.00	20.00	15.04	69.00	5.00
59	30.00	131.00	187.00	20.00	15.03	68.91	5.00
60	30.50	132.00	187.00	30.00	15.01	68.82	5.00
61	31.00	133.00	177.00	20.00	15.01	68.80	5.00
62	31.50	134.00	177.00	20.00	15.00	68.78	5.00
63	32.00	134.00	177.00	10.00	15.00	68.75	5.00
64	32.50	135.00	167.00	20.00	14.99	68.66	5.00
65	33.00	136.00	157.00	20.00	14.99	68.66	5.00
66	33.50	137.00	157.00	20.00	15.00	68.75	5.00
67	34.00	138.00	147.00	20.00	15.00	68.77	5.00
68	34.50	139.00	147.00	20.00	15.00	68.75	5.00
69	35.00	140.00	147.00	20.00	15.00	68.75	5.00
70	35.50	141.00	137.00	10.00	14.99	68.66	5.00
71	36.00	142.00	147.00	10.00	15.00	68.75	5.00
72	36.50	143.00	137.00	10.00	15.00	68.75	5.00
73	37.00	144.00	137.00	20.00	15.00	68.76	5.00
74	37.50	145.00	137.00	10.00	15.00	68.75	5.00
75	38.00	146.00	137.00	20.00	14.99	68.66	5.00
76	38.50	147.00	137.00	20.00	15.00	68.77	5.00
77	39.00	148.00	127.00	10.00	15.00	68.75	5.00
78	39.50	149.00	127.00	10.00	15.00	68.75	5.00
79	40.00	150.00	127.00	10.00	15.00	68.75	5.00
80	40.50	151.00	127.00	10.00	15.00	68.75	5.00
81	41.00	152.00	117.00	10.00	14.99	68.66	5.00
82	41.50	153.00	117.00	0.00	15.00	68.75	5.00
83	42.00	154.00	117.00	10.00	14.99	68.66	5.00
84	42.50	154.00	117.00	0.00	15.00	68.75	5.00

85	43.00	155.00	117.00	10.00	15.00	68.77	5.00
86	43.50	155.00	127.00	20.00	15.00	68.75	5.00
87	44.00	156.00	127.00	10.00	14.99	68.66	5.00
88	44.50	157.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
89	45.00	158.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
90	45.50	158.00	117.00	20.00	15.00	68.75	5.00
91	46.00	159.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
92	46.50	160.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
93	47.00	161.00	127.00	10.00	15.00	68.75	5.00
94	47.50	162.00	127.00	20.00	15.00	68.75	5.00
95	48.00	163.00	127.00	10.00	14.99	68.66	5.00
96	48.50	163.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
97	49.00	164.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
98	49.50	165.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
99	50.00	165.00	127.00	20.00	14.99	68.66	5.00
100	50.50	166.00	127.00	10.00	15.00	68.75	5.00
101	51.00	167.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
102	51.50	168.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
103	52.00	169.00	117.00	10.00	14.99	68.66	5.00
104	52.50	170.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
105	53.00	171.00	127.00	10.00	15.00	68.75	5.00
106	53.50	172.00	117.00	10.00	14.99	68.66	5.00
107	54.00	173.00	127.00	10.00	15.00	68.75	5.00
108	54.50	174.00	127.00	10.00	15.00	68.75	5.00
109	55.00	175.00	127.00	10.00	14.99	68.66	5.00
110	55.50	176.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
111	56.00	177.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
112	56.50	178.00	117.00	10.00	14.99	68.66	5.00
113	57.00	179.00	107.00	10.00	15.00	68.75	5.00
114	57.50	180.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
115	58.00	181.00	107.00	10.00	15.00	68.75	5.00
116	58.50	182.00	117.00	10.00	14.99	68.66	5.00
117	59.00	183.00	107.00	10.00	15.00	68.75	5.00
118	59.50	184.00	107.00	10.00	14.99	68.66	5.00
119	60.00	185.00	117.00	0.00	15.00	68.75	5.00
120	60.50	186.00	107.00	0.00	15.00	68.75	5.00
121	61.00	187.00	107.00	0.00	15.00	68.75	5.00
122	61.50	188.00	107.00	10.00	14.99	68.66	5.00
123	62.00	189.00	107.00	10.00	15.00	68.75	5.00
124	62.50	190.00	107.00	10.00	15.00	68.75	5.00
125	63.00	191.00	117.00	0.00	15.00	68.75	5.00
126	63.50	192.00	107.00	0.00	14.99	68.66	5.00
127	64.00	193.00	107.00	10.00	15.00	68.75	5.00
128	64.50	194.00	107.00	0.00	15.00	68.75	5.00
129	65.00	195.00	117.00	10.00	14.99	68.66	5.00

130	65.50	196.00	107.00	10.00	15.00	68.75	5.00
131	66.00	197.00	107.00	10.00	14.99	68.66	5.00
132	66.50	198.00	107.00	0.00	15.00	68.75	5.00
133	67.00	199.00	107.00	0.00	15.00	68.75	5.00
134	67.50	199.00	117.00	20.00	15.00	68.75	5.00
135	68.00	200.00	107.00	0.00	14.99	68.66	5.00
136	68.50	200.00	107.00	10.00	15.00	68.75	5.00
137	69.00	200.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
138	69.50	200.00	107.00	10.00	15.00	68.75	5.00
139	70.00	200.00	117.00	0.00	15.00	68.75	5.00
140	70.50	200.00	117.00	10.00	15.00	68.75	5.00
141	71.00	200.00	97.00	0.00	14.99	68.66	5.00
142	71.50	200.00	97.00	10.00	15.00	68.75	5.00
143	72.00	200.00	87.00	0.00	15.00	68.75	5.00
144	72.50	200.00	77.00	0.00	14.99	68.66	5.00
145	73.00	200.00	87.00	0.00	15.00	68.75	5.00
146	73.50	200.00	97.00	0.00	15.00	68.75	5.00
147	74.00	200.00	87.00	0.00	15.00	68.75	5.00
148	74.50	200.00	77.00	0.00	15.00	68.75	5.00

Elaborado por el equipo de trabajo.

**ANEXO 18: GRAFICO EXPERIMENTAL M. MANDANI**



Elaborado por el equipo de trabajo.



## ANEXO 19: DATOS EXPERIMENTALES M. TSUKAMOTO

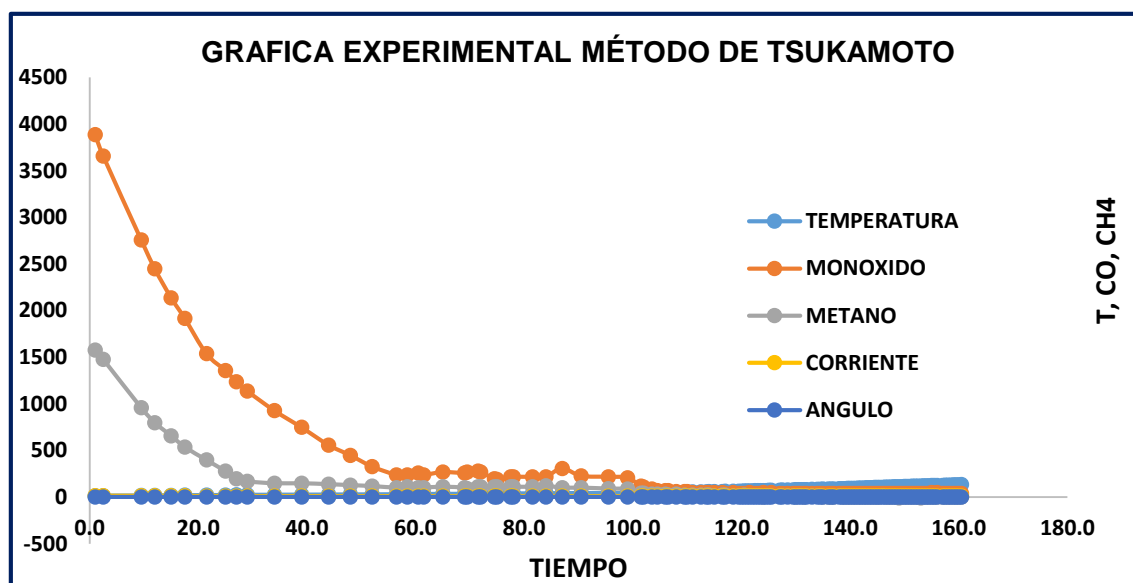
Adquisición de Datos Experimentales con el método de Tsukamoto							
Ítem	Tiempo	Temp	CO	CH4	Corriente	Angulo	P. Comb
1	1.0	14	3887	1577	13.84	61.50%	20.00
2	2.5	15	3657	1477	13.32	58.25%	20.00
3	9.5	16	2757	957	13.12	57.00%	20.00
4	12.0	17	2447	797	12.35	52.19%	20.00
5	15.0	18	2137	657	11.96	49.75%	20.00
6	17.5	19	1917	537	11.87	49.19%	20.00
7	21.5	20	1537	397	11.52	47.00%	20.00
8	25.0	21	1357	277	11.47	46.69%	20.00
9	27.0	22	1237	197	11.43	46.44%	20.00
10	29.0	23	1137	167	11.43	46.44%	20.00
11	34.0	24	927	147	11.38	46.13%	20.00
12	39.0	25	747	147	11.38	46.13%	20.00
13	44.0	26	557	137	11.36	46.00%	20.00
14	48.0	27	447	127	11.28	45.50%	20.00
15	52.0	28	327	117	11.12	44.50%	20.00
16	56.5	29	237	100	10.92	43.25%	20.00
17	58.5	30	237	110	10.92	43.25%	20.00
18	60.5	31	257	100	10.92	43.25%	20.00
19	61.5	32	237	100	10.92	43.25%	20.00
20	65.0	33	267	110	10.92	43.25%	20.00
21	69.0	34	257	100	10.92	43.25%	20.00
22	69.5	35	267	90	10.9	43.13%	20.00
23	71.5	35	277	110	11.2	45.00%	20.00
24	72.0	36	267	110	11.2	45.00%	20.00
25	74.5	36	197	110	11.2	45.00%	20.00
26	75.0	37	187	110	11.2	45.00%	20.00
27	77.5	37	217	110	10.9	43.13%	20.00
28	78.0	38	217	110	10.9	43.13%	20.00
29	81.5	39	217	110	10.9	43.13%	20.00
30	84.0	40	217	120	10.9	43.13%	20.00
31	87.0	41	307	100	11.1	44.38%	20.00
32	90.5	42	227	100	10.9	43.13%	20.00
33	95.5	43	217	90	10.9	43.13%	20.00
34	99.0	44	207	85	10.9	43.13%	20.00
35	101.5	45	117	40	10.9	43.13%	20.00
36	102.0	46	107	40	10.6	41.25%	20.00
37	103.5	47	87	30	10.4	40.00%	20.00
38	104.5	48	67	30	10.2	38.75%	20.00
39	106.0	49	67	30	10.2	38.75%	20.00
40	106.5	50	67	20	10.2	38.75%	20.00

41	108.0	51	57	30	10.1	38.13%	20.00
42	109.5	52	57	20	10.1	38.13%	20.00
43	110.0	53	57	10	10.1	38.13%	20.00
44	111.0	54	47	20	9.99	37.44%	20.00
45	112.5	55	47	20	9.99	37.44%	20.00
46	113.5	56	47	20	9.99	37.44%	20.00
47	114.0	57	47	20	9.99	37.44%	20.00
48	115.0	58	47	10	9.99	37.44%	20.00
49	116.5	59	47	20	9.99	37.44%	20.00
50	117.0	60	37	20	9.98	37.38%	20.00
51	118.5	61	47	10	9.99	37.44%	20.00
52	119.5	62	37	10	9.98	37.38%	20.00
53	120.0	63	37	10	9.98	37.38%	20.00
54	120.5	64	37	20	9.98	37.38%	20.00
55	121.0	65	37	10	9.98	37.38%	20.00
56	121.5	66	47	10	9.99	37.44%	20.00
57	122.0	66	37	10	9.98	37.38%	20.00
58	122.5	67	37	10	9.98	37.38%	20.00
59	123.0	68	37	10	9.98	37.38%	20.00
60	123.5	69	37	10	9.98	37.38%	20.00
61	124.0	70	47	0	9.99	37.44%	20.00
62	124.5	70	37	10	9.98	37.38%	20.00
63	125.0	71	37	10	9.98	37.38%	20.00
64	125.5	72	47	10	9.99	37.44%	20.00
65	127.0	73	37	10	9.98	37.38%	20.00
66	127.5	74	37	10	9.98	37.38%	20.00
67	128.5	75	37	10	9.98	37.38%	20.00
68	129.5	76	37	10	9.98	37.38%	20.00
69	130.0	77	37	0	9.98	37.38%	20.00
70	130.5	78	37	10	9.98	37.38%	20.00
71	131.0	79	37	10	9.98	37.38%	20.00
72	131.5	79	37	0	9.98	37.38%	20.00
73	132.0	80	37	10	9.98	37.38%	20.00
74	133.0	81	37	10	9.98	37.38%	20.00
75	134.0	82	37	10	9.98	37.38%	20.00
76	134.5	83	37	10	9.98	37.38%	20.00
77	135.0	84	37	0	9.98	37.38%	20.00
78	136.0	85	37	0	9.98	37.38%	20.00
79	136.5	86	37	0	9.98	37.38%	20.00
80	137.0	87	37	0	9.98	37.38%	20.00
81	138.0	88	37	10	9.98	37.38%	20.00
82	138.5	89	37	0	9.98	37.38%	20.00
83	139.0	90	37	0	9.98	37.38%	20.00
84	139.5	91	37	0	9.98	37.38%	20.00
85	140.0	92	37	0	9.98	37.38%	20.00

86	140.5	93	37	0	9.98	37.38%	20.00
87	141.0	94	37	0	9.98	37.38%	20.00
88	141.5	95	37	0	9.98	37.38%	20.00
89	142.0	96	37	0	9.98	37.38%	20.00
90	142.5	97	37	0	9.98	37.38%	20.00
91	143.0	98	37	0	9.98	37.38%	20.00
92	143.5	99	37	0	9.98	37.38%	20.00
93	144.0	100	37	0	9.98	37.38%	20.00
94	144.5	101	37	0	9.98	37.38%	20.00
95	145.0	102	37	0	9.98	37.38%	20.00
96	145.5	103	37	0	9.98	37.38%	20.00
97	146.0	104	37	10	9.98	37.38%	20.00
98	146.5	105	37	0	9.98	37.38%	20.00
99	147.0	106	37	0	9.98	37.38%	20.00
100	147.5	107	37	0	9.98	37.38%	20.00
101	148.0	108	37	0	9.98	37.38%	20.00
102	148.5	109	37	0	9.98	37.38%	20.00
103	149.0	110	37	-10	9.98	37.38%	20.00
104	149.5	111	37	0	9.98	37.38%	20.00
105	150.0	112	37	0	9.98	37.38%	20.00
106	150.5	113	37	0	9.98	37.38%	20.00
107	151.0	114	37	0	9.98	37.38%	20.00
108	151.5	115	37	0	9.98	37.38%	20.00
109	152.0	116	37	0	9.98	37.38%	20.00
110	152.5	117	37	0	9.98	37.38%	20.00
111	153.0	118	37	-10	9.98	37.38%	20.00
112	153.5	119	37	0	9.98	37.38%	20.00
113	154.0	120	37	0	9.98	37.38%	20.00
114	154.5	121	37	0	9.98	37.38%	20.00
115	155.0	122	47	0	9.99	37.44%	20.00
116	155.5	123	37	0	9.98	37.38%	20.00
117	156.0	124	47	0	9.99	37.44%	20.00
118	157.0	125	37	0	9.98	37.38%	20.00
119	157.5	126	37	0	9.98	37.38%	20.00
120	158.0	127	37	0	9.98	37.38%	20.00
121	158.5	128	37	0	9.98	37.38%	20.00
122	159.0	129	37	0	9.98	37.38%	20.00
123	159.5	130	37	0	9.98	37.38%	20.00
124	160.0	131	37	0	9.98	37.38%	20.00
125	160.5	132	37	0	9.98	37.38%	20.00

Elaborado por el equipo de trabajo.

ANEXO 20: GRAFICO EXPERIMENTAL M. TSUKAMOTO



Elaborado por el equipo de trabajo.