



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO

AUTORES:

LOACHAMÍN IZA, HENRY DAVID

ÑAUÑAY PUENTE, DIEGO FERNANDO

TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA
HOT-PLATE PARA EL PROCESAMIENTO DE SUSTANCIAS
QUÍMICAS, UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA PARA EL
CONTROL DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA, DESTINADA A
BIOTECNOLOGÍA

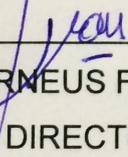
DIRECTOR: ING. TERNEUS, FRANCISCO

CODIRECTORA: DRA. PROAÑO, KARINA

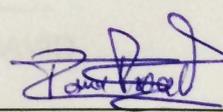
SANGOLQUÍ, JULIO 2015

CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de grado denominado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA HOT-PLATE PARA EL PROCESAMIENTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS, UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA, DESTINADA A BIOTECNOLOGÍA", fue realizado en su totalidad por los señores Loachamín Iza Henry David y Ñauñay Puente Diego Fernando, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniería Mecatrónica.



ING. TERNEUS FRANCISCO
DIRECTOR



DRA. PROAÑO KARINA
CODIRECTORA

Sangolqui, 15 de julio de 2015

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El proyecto de grado denominado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA HOT-PLATE PARA EL PROCESAMIENTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS, UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA, DESTINADA A BIOTECNOLOGÍA", ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas que constan al pie de las paginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

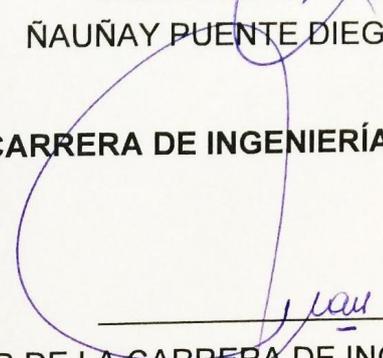


LOACHAMÍN IZA HENRY DAVID



ÑAUÑAY PUENTE DIEGO FERNANDO

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA



DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
ING. FRANCISCO TERNEUS



Sangolqui, 15 de julio de 2015

AUTORIZACIÓN

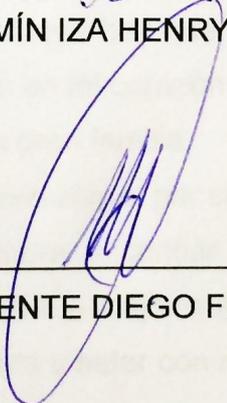
Nosotros:

Diego Fernando Ñauñay Puente y Henry David Loachamín Iza

Autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE, la publicación, en la biblioteca virtual de la institución el trabajo: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA HOT-PLATE PARA EL PROCESAMIENTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS, UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA, DESTINADA A BIOTECNOLOGÍA”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.



LOACHAMÍN IZA HENRY DAVID



ÑAUÑAY PUENTE DIEGO FERNANDO

Sangolqui, 15 de julio de 2015

DEDICATORIA

En primer lugar, dedicado a Dios por ser mi guía en todo momento, por no dejarme vencer con su sabiduría y protección. A la Virgen del Quinche por siempre darme salud, vida y permitirme alcanzar este logro en mi vida.

A mis padres Luis y Amparito quienes con su ejemplo de vida, me han educado con valores basados en el amor de familia, me han cuidado y ayudado en todas las circunstancias adversas, impulsándome a seguir adelante y nunca dejarme de mis sueños.

A mi padre Luis Efraín por ser el primer maestro en mi vida, ser mi ejemplo a seguir y compartir su alegría, sinceridad y serenidad de las cosas; por darme siempre una meta a seguir y enseñarme que la edad no es ningún límite para soñar y seguir adelante.

A mi madre Amparito de los Ángeles por su amor incondicional e infinito, su ejemplo de emprendimiento y lucha en la vida, que me han enseñado que no existen obstáculos en la vida que no sean superables; esto es tu ejemplo de madre, de no descansar y recibir todo con humildad.

A mi hermano José Armando, por su alegría, bondad y carácter, quien siempre me ha enseñado que la vida es un abrir y cerrar de ojos con momentos alegres y tristes, pero que hay que saberlos disfrutar a cada uno de ellos, por la alegría que tengo en mi corazón cada día que pasamos juntos para pelear, reír y jugar, ser una gran familia.

A mi abuelita Angélica y abuelo Jorge, por ser unos pilares fundamentales en mi vida, por cuidarme siempre y confiar en mí. A mi tía Paula, por enseñarme a luchar cada día y dar lo mejor que tiene cada uno. A todos mis familiares, por ser parte de mi vida y estar con migo en las buenas y malas.

A mi enamorada por el amor, comprensión y respeto que siempre me ha demostrado, siendo día a día una maravillosa mujer, amiga y compañera.

Finalmente, lo dedico a todas las personas que tengan sueños, que el dinero y los diversos obstáculos no son impedimentos para estudiar y ser grande en la vida y paso a paso se puede alcanzar los objetivos planteados.

Henry David Loachamín Iza

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto:

A Dios, que ha sabido ser mi consejero fiel y amigo incondicional, me ha sabido guiar en su camino de bien y me ha permitido conseguir este logro en mi vida.

A la Virgen Dolorosa, que con su amor infinito, me ha acompañado y me ha cuidado, protegiéndome bajo su santo manto, en todos los momentos de mi vida.

A mis padres Manuel y Rocío, que con su ejemplo de vida, han sabido amarme, cuidarme y educarme en el camino del bien, impulsando mi vida para obtener grandes logros y luchar por conseguir mis sueños.

A mi padre, por ser siempre un ejemplo a seguir, cuyos logros han sido el motor que ha impulsado a mi deseo de ser ingeniero.

A mi madre, por ser la persona que siempre me ha entregado su amor y dedicación incondicional.

A mis hermanos Xavier y Andrés, por brindarme sus risas, sus enojos y sus locuras, enseñándome el verdadero significado de la amistad y hermandad.

A mis abuelitos, que nunca dejaron de confiar en mí y con su ejemplo, me enseñaron el valor y la recompensa del sacrificio diario.

A mi enamorada Andrea, por el amor y el respeto que me ha brindado, demostrando ser una verdadera amiga y una maravillosa mujer.

Diego Fernando Ñauñay Puente

AGRADECIMIENTO

“Per Aspera Ad Astra”

Agradezco a Dios sobre todas las cosas y a la Virgen del Quinche, por la vida y la fortaleza de seguir adelante día a día, para lograr este sueño tan anhelado de culminar mi carrera universitaria.

Agradezco a mis padres Luis y Amparito, fuente inagotable de apoyo incondicional en la lucha por alcanzar mis sueños y anhelos, gracias porque debido a sus sacrificios y su paciencia han guiado mi andar, para que hoy en día pueda llegar a ser un profesional de la patria, responsable, con valores y un gran ser humano. Además de ser los principales inversionistas de este proyecto.

Agradezco a mi hermano José por su apoyo en los momentos difíciles y su entrega desinteresada, gracias por ser como eres.

Agradezco a mi enamorada por su paciencia y cariño en los momentos de dificultades de este proyecto, gracias por la comprensión y apoyo.

Agradezco a mi compañero de tesis Diego y toda su familia Ñauñay Puente, por todo lo compartido, su amistad, respaldo, los consejos, y la paciencia.

Agradezco al Ing. Francisco Terneus y a la Doc. Karina Proaño, por su guía, por el conocimiento que nos han transmitido de manera abierta y generosa y por sus palabras de aliento, siendo la parte fundamental en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a mi familia por su preocupación y apoyo, siempre estuvieron pendientes del avance y los logros de mi carrera universitaria.

No se puede olvidar aquellos compañeros y compañeras de lucha en las aulas, que con sus ideas y ocurrencias, llenaron de recuerdos este camino, quienes no dudaron en brindar una mano, gracias a todos, amigos y amigas.

Y finalmente agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas – “ESPE”, por permitirme vivir experiencias que no se podrán olvidar, retos alcanzados, gracias por enseñarme que en la vida con este proyecto, cada día se aprende algo nuevo y que los valientes son los que prevalecen.

Henry David Loachamín Iza

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme seguir su camino, por brindarme la salud, por regalarme los dones de la sabiduría y la paciencia para superar cualquier adversidad que se haya presentado en este arduo camino.

Agradezco a mis padres por su apoyo inagotable, por brindarme la fuerza física, intelectual y económica, que me ha permitido lograr la realización de este proyecto.

Agradezco a mis hermanos por su paciencia y el apoyo que me han brindado para culminar este proyecto.

Agradezco a mi enamorada por su paciencia y comprensión en los momentos de dificultad en el desarrollo del proyecto.

Agradezco a mi compañero de tesis por su amistad, apoyo y paciencia.

Agradezco al Ing. Francisco Terneus y la Dra. Karina Proaño, por su amistad y su apoyo intelectual brindado en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco el apoyo de toda mi gran familia, que siempre han estado pendientes del avance del proyecto de investigación.

Agradezco a mis amigos por su apoyo y colaboración, y a todas las personas que no dudaron en brindar su ayuda para la realización de este proyecto.

Finalmente, agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas, por brindarme el anhelo y deseo de aprender más cada día, para poner el conocimiento de este proyecto al servicio del Ecuador.

Diego Fernando Ñauñay Puente

Contenido

CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xxi
RESUMEN.....	xxiii
ABSTRACT.....	xxiv
1. CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.1.1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO.....	1
1.1.2. ANTECEDENTES	1
1.1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	5
1.1.5. ÁREA DE INFLUENCIA	7
1.1.6. OBJETIVOS	8
1.1.6.1. OBJETIVO GENERAL	8
1.1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.1.7. ALCANCE	8
2. CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. INTRODUCCIÓN	10
2.1.1. INSTRUMENTOS DE LABORATORIOS	10
2.1.2. HOT-PLATE	11
2.1.3. MEDIOS DE CULTIVO.....	12
2.2. SISTEMAS DE CONTROL.....	13
2.2.1. RESEÑA HISTÓRICA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	13
2.2.2. TEORÍA DE SISTEMAS DE CONTROL	15
2.2.2.1. ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.....	16
2.2.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	20

2.3.	SISTEMAS DE CONTROL DIFUSO	24
2.3.1.	INTRODUCCIÓN	24
2.3.2.	TEORÍA DE CONTROL DIFUSO	25
2.3.2.1.	ELEMENTOS DEL CONTROL DIFUSO	26
2.3.2.2.	CONTROLADORES DIFUSOS.....	33
2.4.	SISTEMAS MECÁNICOS	36
2.4.1.	TERMODINÁMICA Y TRASFERENCIA DE CALOR.....	36
2.4.1.1.	TRANSFERENCIA DE ENERGÍA.....	37
2.4.1.2.	PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA	38
2.4.1.3.	BALANCE DE ENERGÍA EN LA SUPERFICIE.....	39
2.4.1.4.	MECANISMOS DE TRASFERENCIA DE CALOR	40
2.4.1.5.	CONDUCCIÓN	40
2.4.1.6.	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	41
2.4.1.7.	CONVECCIÓN.....	42
2.4.2.	SISTEMAS MAGNÉTICOS	43
2.4.2.1.	MATERIALES MAGNÉTICOS	44
2.4.3.	PROCESOS DE MANUFACTURA EN CHAPA METÁLICA	44
2.4.3.1.	PROCESOS DE DOBLADO Y CURVADO	45
2.4.3.2.	PROCESOS DE PUNZONADO	46
2.5.	SISTEMAS ELÉCTRICOS/ELECTRÓNICOS.....	47
2.5.1.	MOTORES A PASOS	47
2.5.2.	SISTEMAS DE CALENTAMIENTO.....	48
2.5.2.1.	RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	48
2.5.2.2.	SISTEMAS DE RESISTENCIAS PLANAS	49
2.5.3.	ARDUINO.....	49
2.5.3.1.	PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN I ² C	51
3.	CAPÍTULO 3. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA HOT- PLATE.....	52
3.1.	PARÁMETROS DE DISEÑO	52
3.1.1.	PARÁMETROS DE CONTROL.....	52
3.1.2.	PARÁMETROS DE INSTRUMENTACIÓN	53

3.1.3.	PARÁMETROS DE LA ESTRUCTURA METÁLICA.....	54
3.1.4.	PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO.....	55
3.2.	SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	55
3.2.1.	SELECCIÓN DEL MOTOR	55
3.2.2.	DIMENSIONAMIENTO DE LA RESISTENCIA PLANA.....	57
3.3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO.....	61
3.3.1.	CONTROLADOR DIFUSO DE TEMPERATURA.....	63
3.3.1.1.	SISTEMA DE CONTROL DE LA TEMPERATURA EN EL PLATO	64
3.3.1.2.	SISTEMA DE CONTROL DE LA TEMPERATURA EN EL FLUIDO.....	71
3.3.2.	CONTROLADOR DIFUSO DE VELOCIDAD	77
3.4.	DISEÑO ELECTRÓNICO.....	87
3.4.1.	CIRCUITOS ELECTRÓNICOS	87
3.4.1.1.	INSTRUMENTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LA TERMOCUPLA TIPO K.....	87
3.4.1.2.	INSTRUMENTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR RTD TIPO PT100.....	89
3.4.1.3.	CONEXIÓN DEL DRIVER A4988	94
3.4.1.4.	FUENTES DE ALIMENTACIÓN.....	96
3.4.1.5.	CIRCUITO PARA BOTÓN DE EMERGENCIA	99
3.4.2.	PLACA ELECTRÓNICA DE CONTROL.....	100
3.4.2.1.	CÁLCULO DEL ANCHO DE PISTA.....	102
3.4.3.	CIRCUITOS ELÉCTRICOS.....	105
3.4.3.1.	CIRCUITO DE CONMUTACIÓN AC	105
3.4.3.2.	CIRCUITO DE ALARMA AUDITIVA.....	106
3.4.4.	PLACA ELÉCTRICA DE POTENCIA	106
3.4.4.1.	CÁLCULO DEL ANCHO DE PISTA	106
3.5.	DISEÑO MECÁNICO Y ESTRUCTURAL	108
3.5.1.	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA.....	109

3.5.1.1. ESTRUCTURA BASE	109
3.5.1.2. TAPA PRINCIPAL	113
3.5.1.3. PLATO TÉRMICO Y ELEMENTOS AISLANTES	114
3.5.1.4. PORTA-IMANES	116
3.5.1.5. VISTA DE CONJUNTO	117
3.5.2. ESPESOR DE CHAPA METÁLICA.....	119
3.5.3. SISTEMA DE TRANSMISIÓN MAGNÉTICA	121
3.5.3.1. FUERZA DE SUJECIÓN MAGNÉTICA.....	121
4. CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA HOT-PLATE	123
4.1. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO	123
4.1.1. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL EQUIPO	123
4.1.2. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MAGNÉTICO DE MOVIMIENTO ROTACIONAL.....	125
4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO	126
4.2.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MOTOR NEMA 17	126
4.2.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA RESISTENCIA PLANA	127
4.2.3. IMPLEMENTACIÓN DE LA PANTALLA TÁCTIL Y ELEMENTOS ELECTRÓNICOS.....	128
4.2.4. PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO	131
4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO	140
4.3.1. IMPLEMENTACIÓN Y LECTURA DE LOS SENSORES.....	140
4.3.2. PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DIFUSO	142
4.3.3. LIMITACIÓN DE LA POTENCIA PARA EL CONTROL.....	144
4.3.3.1. RANGOS DE POTENCIA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN EL PLATO	145
4.3.3.2. RANGOS DE POTENCIA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN EL FLUIDO.....	145
4.4. COMUNICACIÓN ENTRE EL ARDUINO MAESTRO Y EL ARDUINO ESCLAVO.....	146

4.4.1.	COMUNICACIÓN I ² C.....	147
4.5.	CONEXIÓN DEL SISTEMA	148
5.	CAPÍTULO 5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO HOT-PLATE	151
5.1.	CURVAS DE FUNCIONAMIENTO.....	151
5.1.1.	CONTROL TÉRMICO SOBRE EL PLATO.....	151
5.1.2.	CONTROL TÉRMICO SOBRE EL FLUIDO	152
5.1.3.	CONTROL SOBRE EL MOTOR NEMA 17	153
5.2.	CARACTERÍSTICAS FINALES DEL EQUIPO.....	153
6.	CAPÍTULO 6. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SISTEMA HOT-PLATE	155
6.1.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	155
6.1.1.	COSTOS DIRECTOS.....	155
6.1.2.	COSTOS INDIRECTOS.....	157
7.	CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	160
7.1.	CONCLUSIONES.....	160
7.2.	RECOMENDACIONES	162
7.3.	BIBLIOGRAFÍA	163
8.	CAPÍTULO 8. ANEXOS	167
8.1.	MANUAL DE USUARIO	168
8.2.	PLANOS ELÉCTRICOS, ELECTRÓNICOS Y DE CONEXIÓN	181
8.2.1.	CIRCUITOS DE CONTROL	182
8.2.2.	CIRCUITOS DE POTENCIA	183
8.2.3.	PLACA DE CONTROL	184
8.2.4.	PLACA DE POTENCIA	185
8.2.5.	DIAGRAMA DE CONEXIÓN ELECTRÓNICA.....	186
8.3.	PLANOS MECÁNICOS.....	187
8.3.1.	HOT-PLATE	188
8.3.2.	VISTAS HOT-PLATE	189
8.3.3.	HOT-PLATE EXPLOSIONADO.....	190

8.3.4.	ESTRUCTURA BASE	191
8.3.5.	ESTRUCTURA BASE DOBLADA	192
8.3.6.	TAPA PRINCIPAL	193
8.3.7.	PLATO TÉRMICO	194
8.3.8.	PLATO TÉRMICO DOBLADO	195
8.3.9.	TAPA TÉRMICA.....	196
8.3.10.	TAPA PRINCIPAL	197
8.3.11.	GANCHO	198
8.3.12.	GANCHO SOLDADO	199
8.3.13.	ALZA	200
8.3.14.	PORTA-IMANES	201
8.4.	CÓDIGO DE MICROCONTROLADORES	202
8.4.1.	CÓDIGO DEL ARDUINO MEGA.....	202
8.4.2.	CÓDIGO DEL ARDUINO NANO	223
	LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	229

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Exportaciones primarias como porcentaje del total de las ventas externas	1
Figura 1.2. El cambio de la Matriz Productiva para alcanzar el Buen Vivir.....	3
Figura 2.1. Hot-Plate analógico de un plato.....	11
Figura 2.2. Componentes básicos de un sistema de control	17
Figura 2.3. Componentes de un sistema de control.....	19
Figura 2.4. Elementos del control en lazo abierto	21
Figura 2.5. Elementos del control en lazo cerrado.....	22
Figura 2.6. Diagrama de control de un sistema <i>SISO</i>	24
Figura 2.7. Diagrama de control de un sistema <i>MIMO</i>	24
Figura 2.8. Elementos principales de un sistema difuso	27
Figura 2.9. Formas de funciones de pertenencia más utilizados	28
Figura 2.10. Grados de fusificación en función del número de funciones de membresía	30
Figura 2.11. Salida de un sistema de control difuso	32
Figura 2.12. Defusificación mediante el método del centroide.....	33
Figura 2.13. Motor de interferencia de un controlador difuso.....	33
Figura 2.14. Estructura típica de un controlador difuso.....	34
Figura 2.15. Estructura de un controlador difuso en lazo abierto.....	35
Figura 2.16. Estructura de un controlador difuso en lazo cerrado	35
Figura 2.17. Sistema energético en operación estacionaria	38
Figura 2.18. Interacciones energéticas en la superficie exterior de la pared de una casa	39
Figura 2.19. Campo Magnético.....	43
Figura 2.20. Motor Nema 17	47
Figura 2.21. Resistencia Plana	49
Figura 2.22. Arduino Mega	50
Figura 2.23. Protocolo de Comunicación I ² C	51
Figura 3.1. Comparativos de sensores de temperatura	53
Figura 3.2. Termocupla tipo anillo marca WATLOW.....	54

Figura 3.3. RTD metálico de la marca WATLOW	54
Figura 3.4. Driver A4988.....	56
Figura 3.5. Arduino Nano.....	57
Figura 3.6. Esquema para el Dimensionamiento de la Resistencia Plana	59
Figura 3.7. Plantas de control del Hot-Plate	62
Figura 3.8. División de los sistemas de control de temperatura.....	63
Figura 3.9. Diagrama del sistema de control de temperatura en el plato.....	65
Figura 3.10. Funciones de membresía de entrada del controlador de temperatura en el plato.....	66
Figura 3.11. Modulación de ancho de pulso (PWM)	67
Figura 3.12. Funciones de membresía de salida del controlador de temperatura en el plato.....	68
Figura 3.13. Reglas de fusificación del controlador de temperatura en el plato	70
Figura 3.14. Superficie de control del sistema de temperatura en el plato.....	70
Figura 3.15. Diagrama del sistema de control de temperatura en el fluido	72
Figura 3.16. Funciones de membresía de entrada del controlador de temperatura en el fluido	73
Figura 3.17. Funciones de membresía de salida del controlador de temperatura en el fluido	74
Figura 3.18. Reglas de fusificación del controlador de temperatura en el fluido	76
Figura 3.19. Superficie de control del sistema de temperatura en el fluido	76
Figura 3.20. Velocidad de rotación en función del periodo de tiempo.....	79
Figura 3.21. Diagrama del sistema de control de velocidad	80
Figura 3.22. Funciones de membresía de entrada del controlador de velocidad	82

Figura 3.23. Funciones de membresía de salida del controlador de velocidad	83
Figura 3.24. Reglas de fusificación del controlador de velocidad	85
Figura 3.25. Superficie de control del sistema de velocidad	86
Figura 3.26. Configuración de alimentación dual del C.I. AD595.....	88
Figura 3.27. Circuito electrónico para la lectura de la termocupla tipo K.....	89
Figura 3.28. Circuito Puente de Wheatstone	90
Figura 3.29. Diagrama de conexión del C.I. AD620.....	91
Figura 3.30. Amplificación del Puente de Wheatstone.....	93
Figura 3.31. Circuito electrónico para la lectura del sensor PT100.....	94
Figura 3.32. Diagrama de conexión mínimo del driver A4988	94
Figura 3.33. Circuito electrónico para el driver A4988 y el motor a pasos Nema 17.....	96
Figura 3.34. Diagrama de conexión para los reguladores de voltaje LM78XX.....	97
Figura 3.35. Circuito electrónico de conexión de fuentes de voltaje positivas.....	98
Figura 3.36. Diagrama de conexión para los reguladores de voltaje LM79XX.....	98
Figura 3.37. Circuito electrónico de conexión de fuentes de voltaje negativas	98
Figura 3.38. Circuito para las fuentes de voltaje de los circuitos electrónicos	99
Figura 3.39. Circuito para el botón de emergencia	100
Figura 3.40. Conectores de entrada y salida de la placa PCB de control.....	101
Figura 3.41. Diagrama de montaje del Arduino Nano en la placa de control.....	101
Figura 3.42. Distribución de los pines de conexión del Arduino Nano	102
Figura 3.43. Selección del ancho de pista en función de la temperatura de trabajo	103

Figura 3.44. Selección del ancho de pista en función del material de la PCB	104
Figura 3.45. Placa PCB de control.....	104
Figura 3.46. Circuito de conmutación de corriente alterna.....	105
Figura 3.47. Circuito para el control de potencia en la resistencia plana.....	105
Figura 3.48. Circuito electrónico de alarma auditiva	106
Figura 3.49. Placa PCB de potencia	108
Figura 3.50. Opciones de procesos de manufactura para el diseño de la estructura	108
Figura 3.51. Metodología para el diseño estructural	109
Figura 3.52. Pantalla touch SainSmart, 4.3”	110
Figura 3.53. Switch on/off rojo	110
Figura 3.54. Led autoenclavante rojo.....	110
Figura 3.55. Leds indicadores.....	111
Figura 3.56. Vista isométrica de la estructura base del equipo.....	111
Figura 3.57. Descripción de las perforaciones y cortes de la estructura base	112
Figura 3.58. Orificios posteriores en la estructura base.....	113
Figura 3.59. Simulación de la tapa principal y de elementos electrónicos	113
Figura 3.60. Plato térmico	114
Figura 3.61. Tapa térmica.....	115
Figura 3.62. Tapa térmica principal.....	115
Figura 3.63. Gancho de sostén para el plato térmico	116
Figura 3.64. Alza del plato	116
Figura 3.65. Porta-imanes	117
Figura 3.66. Simulación del equipo Hot-Plate y los elementos electrónicos	117
Figura 3.67. Vista explosionada del conjunto mecánico	118
Figura 3.68. Plato Térmico.....	119
Figura 3.69. Experimento Fuerza de Sujeción.....	121

Figura 3.70. Encerar al dinamómetro.....	122
Figura 4.1. Diagrama de operación de procesos del Plato térmico.....	124
Figura 4.2. Ensamble motor y porta-imanes	126
Figura 4.3. Implementación del motor Nema 17.	127
Figura 4.4. Implementación de la resistencia plana	128
Figura 4.5. Implementación de la pantalla táctil y elementos electrónicos	129
Figura 4.6. Panel frontal de control del equipo Hot-Plate.....	130
Figura 4.7. Diagrama de programación de la Interfaz de usuario	131
Figura 4.8. Librerías para la pantalla TFT	131
Figura 4.9. Datos de la pantalla y el <i>shield</i>	132
Figura 4.10. Inicialización de variables	132
Figura 4.11. Ejemplo de programación de una pantalla: pantalla de presentación	133
Figura 4.12. Pantalla de presentación	133
Figura 4.13. Programa principal.....	134
Figura 4.14. Interfaz del menú principal.....	134
Figura 4.15. Programación pantalla de menú (primera parte)	135
Figura 4.16. Programación pantalla de menú (segunda parte).....	135
Figura 4.17. Programación pantalla de menú (tercera parte)	136
Figura 4.18. Pantalla de Temperatura	137
Figura 4.19. Pantalla de temperatura de fluido	137
Figura 4.20. Pantalla de temperatura plato.....	138
Figura 4.21. Pantalla de velocidad.....	138
Figura 4.22. Pantalla de temporizador	139
Figura 4.23. Pantalla de ejecución.....	139
Figura 4.24. Pantalla de ejecución en emergencia	140
Figura 4.25. Inicialización de variables para la lectura de los sensores	140
Figura 4.26. Código de acondicionamiento para los sensores	141
Figura 4.27. Inicialización del controlador difuso en arduino	142

Figura 4.28. Programación de las funciones de membresía de entrada	143
Figura 4.29. Programación de las funciones de membresía de salida.....	143
Figura 4.30. Programación de las reglas difusas	144
Figura 4.31. Proceso de fusificación y defusificación en arduino.....	144
Figura 4.32. Código de envío del dato a través de la comunicación I ² C.....	147
Figura 4.33. Código de lectura del dato a través de la comunicación I ² C.....	148
Figura 4.34. Estructura microcontrolador master	149
Figura 4.35. Estructura microcontrolador esclavo.....	149
Figura 4.36. Diagrama de conexión	150
Figura 5.1. Curva de control de temperatura sobre el plato térmico	152
Figura 5.2. Curva de control de temperatura sobre el fluido	152
Figura 5.3. Curva de control de velocidad sobre el motor.....	153
Figura 5.4. Fotografía del equipo Hot-Plate	154

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tabulación de las reglas de fusificación.....	31
Tabla 2.2. Conductividades térmicas de materiales a temperatura ambiente.....	41
Tabla 3.1 Características principales, motor Nema 17	55
Tabla 3.2 Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.....	58
Tabla 3.3. Elementos del sistema de control de la temperatura en el plato.....	64
Tabla 3.4. Funciones de membresía de entrada del controlador de temperatura en el plato.....	66
Tabla 3.5. Funciones de membresía de salida del controlador de temperatura en el plato.....	68
Tabla 3.6. Reglas de fusificación del controlador de temperatura en el plato	69
Tabla 3.7. Valores de la salida del controlador de la temperatura en el plato	71
Tabla 3.8. Elementos del sistema de control de la temperatura en el fluido	72
Tabla 3.9. Funciones de membresía de entrada del controlador de temperatura en el fluido	73
Tabla 3.10. Funciones de membresía de salida del controlador de temperatura en el fluido	74
Tabla 3.11. Reglas de fusificación del controlador de temperatura en el fluido	75
Tabla 3.12. Valores de la salida del controlador de la temperatura en el fluido	77
Tabla 3.13. Elementos del sistema de control de velocidad	78
Tabla 3.14. Relación entre la velocidad de rotación y el periodo de tiempo.....	78
Tabla 3.15. Relación entre la velocidad de rotación y el periodo de tiempo.....	80

Tabla 3.16. Funciones de membresía de entrada del controlador de velocidad	81
Tabla 3.17. Funciones de membresía de salida del controlador de velocidad	83
Tabla 3.18. Reglas de fusificación del controlador de velocidad	84
Tabla 3.19. Valores de la salida del controlador de velocidad	86
Tabla 3.20. Características del circuito integrado AD595	87
Tabla 3.21. Características del amplificador operacional AD620.....	90
Tabla 3.22. Valores de resistencia del sensor PT100 en función de la temperatura	91
Tabla 3.23. Tabla de verdad para la resolución del <i>microstepping</i>	95
Tabla 3.24. Características de operación para el cálculo del ancho de pista de la placa de control	102
Tabla 3.25. Características operativas para el cálculo del ancho de pista placa de potencia	107
Tabla 3.26. Dilataciones Térmicas en el Plato Térmico	120
Tabla 4.1. Tiempos de construcción de las piezas del equipo	125
Tabla 4.2. Colores del led de acuerdo a la operación del equipo	130
Tabla 4.3. Valores máximos de potencia PWM para los rangos de temperatura en el plato.....	145
Tabla 4.4. Valores máximos de potencia PWM para los rangos de temperatura en el fluido	146
Tabla 4.5. Tabla de verdad de las banderas de comunicación entre los microcontroladores.....	147
Tabla 5.1. Características finales del equipo	153
Tabla 6.1. Costos Directos.....	155
Tabla 6.2. Costos de Materiales Indirectos.....	158
Tabla 6.3. Costos Indirectos Mano de Obra	158
Tabla 6.4. Costos Operativos.....	158
Tabla 6.5. Costos Indirectos Totales.....	158
Tabla 6.6. Costo Total.....	159

RESUMEN

El impulso competitivo del conocimiento en el país, ha permitido el desarrollo de equipos, con nuevas tecnologías, innovadores, de bajo costo y de libre acceso, promoviendo nuevos campos investigativos que aporten al desarrollo científico del Ecuador. A nivel mundial, el desarrollo del software libre, ha permitido el acceso gratuito a tecnologías de alto nivel y el desarrollo de proyectos complejos, sin privatización del conocimiento. El avance científico en el área de mecatrónica, presenta un aporte esencial en el desarrollo de esta investigación, pues mediante la sinergia entre la mecánica, la electrónica y el control inteligente, ha sido posible la optimización de los procesos y de la metodología de diseño. El presente proyecto, pretende el desarrollo de un equipo diseñado y fabricado dentro del país, de manera innovadora y cumpliendo con los requerimientos específicos orientados a la investigación científica en el área de Biotecnología. Este equipo utilizará lógica difusa para su control, haciéndolo más versátil y con mayores prestaciones que otros equipos. Se implementará una interfaz gráfica, a partir de una pantalla táctil, amigable y de fácil entendimiento para el usuario. Se utilizará software libre y se implementará el controlador en la plataforma de Arduino. En este documento, se encontrará detallada la base teórica que se ha utilizado, el diseño del equipo, la implementación de cada sistema, las pruebas de funcionamiento que respaldan la eficiencia del equipo, el detalle económico de la inversión realizada, el manual de usuario, el algoritmo de programación de los microcontroladores y los planos de diseño estructural y electrónico.

PALABRAS CLAVE:

- **SISTEMAS DE CONTROL**
- **SISTEMAS DE CONTROL DIFUSO**
- **LÓGICA DIFUSA**
- **SISTEMA EMBEBIDO**
- **CHAPA METÁLICA**

ABSTRACT

Competitive advance of knowledge in the country, has allowed the development of electronic equipment, innovative, with new technologies, low cost and freely accessible, promoting new areas of research that contribute to the scientific development of Ecuador. Globally, the development of free software, has allowed free access to high-level technologies and the development of complex projects without privatization of knowledge. Scientific progress in the mechatronics area, presents an essential contribution to the development of this research, because through synergy between mechanics, electronics and intelligent control, has been possible to optimize processes and design methodology. This project aims to develop an equipment designed and manufactured within the country, innovatively and to meet specific requirements oriented at scientific research in the biotechnology area. This machine will use a fuzzy logic controller making it, more versatile and higher performance than others. The machine uses a touchscreen, friendly and easy to understand for the user. The Hot Plate will work with free software and the controller will be implemented on the Arduino platform. In this document, you will find detailed theoretical base to be used, equipment design, implementation of each system, functional tests that support equipment efficiency, the financial details of the investment, the user manual, the scheduling algorithm implemented in microcontrollers and structural drawings and electronic design.

KEYWORDS:

- **CONTROL SYSTEMS**
- **FUZZY LOGIC CONTROL SYSTEM**
- **FUZZY LOGIC**
- **EMBEDDED SYSTEM**
- **SHEET METAL**

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA HOT-PLATE PARA EL PROCESAMIENTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS, UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA, DESTINADA A BIOTECNOLOGÍA”.

1.1.2. ANTECEDENTES

El desarrollo de la industria ha sido limitado en la historia del Ecuador, ya que su economía se ha basado en la producción de materia prima. Inicialmente, la fuerza económica se concentró en los sectores dedicados a la agricultura como la siembra, cosecha y exportación del banano, cacao, arroz, así como de otros productos. Posteriormente, el descubrimiento de yacimientos de crudo de petróleo en tierras ecuatorianas, su explotación y exportación, se convirtió en el principal ingreso económico.

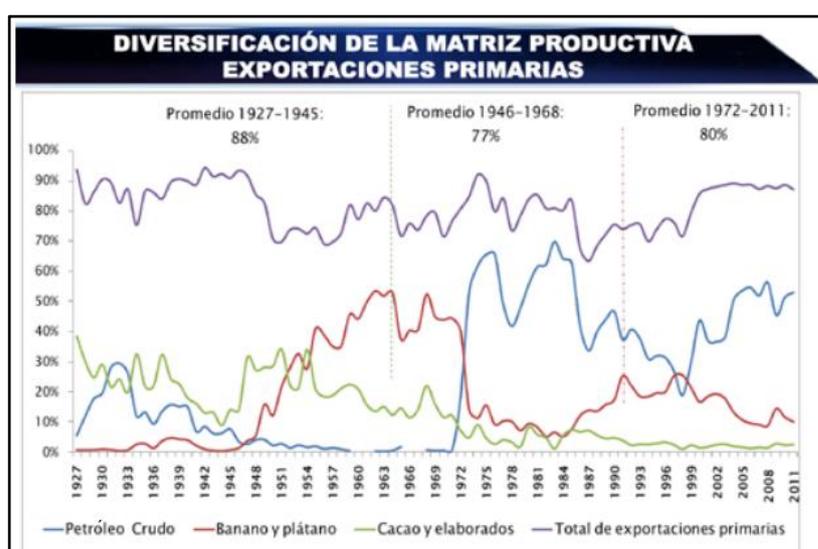


Figura 1.1. Exportaciones primarias como porcentaje del total de las ventas externas

Fuente: (SENPLADES, 2012)

En la Figura 1.1 se destaca el porcentaje de las exportaciones de materia prima en diferentes años (1927 al 2011) en el Ecuador, donde se observa claramente una exportación de cerca de 80% de materia prima.

El desarrollo tecnológico limitado ha disminuido el desarrollo de equipos, maquinaria, tecnología y productos terminados con valor agregado, ya que muy pocas empresas se han interesado en este campo. Este problema ha provocado la búsqueda de soluciones en otros países para solventar la necesidad del país; un ejemplo de esto es China, nación con mayor producción de desarrollo tecnológico en el mundo, China se ha convertido en uno de los principales proveedores de productos, ocasionando una balanza comercial negativa en la economía ecuatoriana.

La demanda tecnológica en la industria ecuatoriana incentivó a los pequeños talleres metalmecánicos y eléctricos a innovar y generar desarrollo técnico en el país a pequeña escala, asumiendo inicialmente la fabricación de equipos y maquinas, con el objetivo de satisfacer las necesidades del país y solventar las expectativas de la industria. Sin embargo, es difícil para el mercado ecuatoriano competir con equipos importados, debido a que sus productos presentaban mejor calidad, más facilidades de uso, e inclusive garantía, ya que son fabricados por empresas con experiencia en el mercado y de renombre mundial. Lamentablemente los productos de fabricación nacional no han podido competir en el mercado, pues la tecnología utilizada en el país para la fabricación de estos productos nacionales ha sido limitada y desactualizada.

Un hito histórico en el desarrollo tecnológico del país, es el primer vehículo diseñado y ensamblado en el Ecuador, el recordado Andino. Alrededor de los años 60's, este vehículo fue la punta de lanza en la industria automotriz ecuatoriana, la cual en las últimas décadas se ha desarrollado considerablemente, junto con la industria metal mecánica.

Desde el inicio del siglo XXI, en el Ecuador se ha fomentado valorar el conocimiento y talento ecuatoriano; la nueva mentalidad de la sociedad ecuatoriana se ha vuelto más competitiva en el mercado internacional, incentivando a generar productos y servicios con valor agregado.

En la actualidad en el gobierno existe un objetivo central, que se denomina: “*El cambio de la Matriz Productiva*” (Figura 1.2). Este proceso pretende la transformación total de la estructura económica del país, dejando de ser un estado únicamente exportador de petróleo, y productor de materia prima para el mercado internacional, para convertirse en un país generador de productos elaborados. Además es importante brindar servicios con valor agregado y de conocimiento, de modo que la industria ecuatoriana comience a tener un rol importante en la economía, provocando de esta manera, una balanza comercial positiva para el país.



Figura 1.2. El cambio de la Matriz Productiva para alcanzar el Buen Vivir

Fuente: (SENPLADES, 2012)

Las políticas públicas que se han implementado en la sociedad ecuatoriana, han beneficiado al mercado de manera significativa, impulsando a que el capital sea invertido en el país y que se impulse el desarrollo tecnológico nacional para satisfacer la demanda provocada.

El objetivo principal del proyecto de “Cambio de la Matriz Productiva”, radica en apoyar el talento de personas innovadoras y con liderazgo, que desean ser generadoras de conocimiento, demostrando tener aptitudes y actitudes necesarias para competir a nivel mundial, en diseñar y producir productos de mayor calidad.

En este sentido los Institutos de Educación Superior cumplen un rol fundamental en el cambio de la matriz productiva. La misión de las universidades es generar conocimiento, que beneficie a la sociedad, por esta razón es necesario proyectos que permitan realizar investigaciones y desarrollar equipos y maquinas, con normas, certificaciones y seguridades correspondientes.

La evolución tecnológica y del conocimiento en el que se enmarca el país, ha visto la necesidad de diseñar e implementar equipos especializados de laboratorios que cuenten con variables específicas, demostrando que existe talento de personas ecuatorianas que pueden aportar al desarrollo del país.

Los equipos que actualmente se usan, están desarrollados con tecnología desactualizada, que limitan los proyectos de investigación. Además, muchos de los equipos no son eficientes, debido a que no controlan variables en tiempo real y consumen más energía eléctrica de la necesaria.

1.1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente los laboratorios de investigación en el Ecuador, tienen un gran problema en la adquisición de equipo tecnológico actualizado, lo cual interfiere de manera significativa en los resultados que se desean obtener. Los Institutos de Educación Superior, para poder actualizar los equipos existentes además de su alto costo, requieren importar la tecnología de otros países, debido a que en nuestro país no se fabrican equipos a este nivel.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE existen diferentes carreras que realizan investigación en áreas dedicadas al desarrollo en ciencias de la vida. Este es el caso de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología, que utiliza equipos de última tecnología, implementos de alta calidad y requerimientos especiales, donde la inversión por equipo es sumamente alto debido a que la gran mayoría de estos equipos son importados.

Entre los equipos utilizados en la carrera de Biotecnología, existe uno cuyo funcionamiento es crítico y sensible, el cual es usado como herramienta para la preparación de las mezclas químicas y es conocido como Hot-Plate. Este equipo tiene algunas limitantes, como es la falta de control de temperatura en el fluido, lo que provoca que se desperdicie la sustancia, gastando recursos importantes y de alto valor económico. Por efecto de este inconveniente, muchas de las veces los equipos suelen dañarse por problemas de filtración de líquidos en su interior, provocando que los elementos eléctricos y electrónicos que lo componen se dañen.

En la Carrera de Biotecnología, es necesario tener un equipo que permita la agitación y elevación de temperatura de sustancias químicas, donde se controlen variables específicas, como son la temperatura del fluido y la velocidad de agitación. Estas limitantes son importantes cuando al momento de desarrollar un proyecto de investigación, además de mantener la seguridad e integridad de las personas que lo operan.

1.1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Es importante para el Ecuador tener equipos de última generación para poder realizar productos con un valor agregado que ayuden a elevar la calidad, confiabilidad y la demanda de los mismos, con el objetivo de volver competitivo a nivel nacional e internacional el producto ecuatoriano.

En las áreas de investigación que se desarrollan en el país, especialmente en los Institutos de Educación Superior, son necesarios equipos de alto nivel tecnológico y de gran exactitud, para obtener resultados que beneficien a la sociedad. El área de ciencias de la vida tiene la responsabilidad de garantizar los resultados que se obtienen a partir de sus investigaciones. Por este motivo, es importante tener equipos y herramientas que permitan realizar de forma correcta los procesos que la investigación, asegurando los resultados obtenidos.

En los laboratorios del área de Biotecnología, de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, se utilizan equipos de última generación, que ayudan a todas las investigaciones que se realizan. Algunos de esos equipos, son muy costosos en el mercado, generando muchas veces limitantes en la adquisición de los mismos. De igual manera debido al costo, muchas veces, se adquiere equipos de estándares menores a los requeridos, lo que limita las áreas de estudio.

El proyecto a desarrollarse, implica el diseño de un Hot-Plate que permita el control de variables fundamentales, lo cual tendrá un amplio campo de utilización en el área de Biotecnología y en especial en el cultivo de tejido vegetal *in vitro*. Este equipo será desarrollado con el fin de satisfacer las necesidades de modernización, automatización y control requeridas por los laboratorios de la carrera de Biotecnología.

La importancia de esta tesis, radica en el abastecimiento de nueva tecnología con requerimientos de funcionamiento precisos y de bajo costo para cubrir las necesidades de equipos similares, que consuma baja energía eléctrica y que permita controlar variables para el buen funcionamiento del laboratorio.

Se pretende dar solución a los problemas específicos que se generan en el laboratorio, creando un equipo con mejores prestaciones a comparación de los equipos que se encuentran en la actualidad en el mercado, aumentando su eficiencia, implementando el control de sus componentes principales y mejorando el manejo de las variables en tiempo real.

Este proyecto aportará a nuestro país en el desarrollo de nueva tecnología, equipos y sistemas a partir del conocimiento cultivado en el Ecuador y de esa manera, demostrar que en el país se puede generar productos con valor agregado y altos estándares de calidad, cumpliendo con el objetivo del proyecto del cambio de la matriz productiva que se desarrolla en el país.

1.1.5. ÁREA DE INFLUENCIA

El área directa de influencia de este proyecto, es facilitar la realización de medios de cultivo necesarios para el estudio de distinto tipos de organismos, bacterias, hongos y plantas en el laboratorio de cultivo de tejidos. La investigación en las áreas de conservación de especies vegetales, y en el análisis de plantas para la mejora de la producción agrícola en el país. Todas las áreas se verán fortalecidas por la utilización y desarrollo de este equipo.

En una prospectiva hacia el futuro, el equipo que se desarrollará, será una herramienta muy útil y de vital importancia no solo por su alta innovación, sino para próximas investigaciones que se realicen en los laboratorios de biotecnología, permitiendo así el trabajo conjunto entre dos áreas muy importantes a nivel nacional y que se encuentran dentro de la matriz productiva del país, que son la Biotecnología y Mecatrónica.

1.1.6. OBJETIVOS

1.1.6.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir una máquina Hot-Plate con sistemas de calentamiento, agitación y de temporización, para el procesamiento de sustancias químicas, utilizando lógica difusa y arduino para su control.

1.1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar y diseñar los sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos que permitan el correcto funcionamiento de los elementos de control de Temperatura y Velocidad de la máquina Hot-Plate.
- Automatizar el sistema a través de un controlador difuso que permita controlar las variables de temperatura y velocidad que se requieren en el sistema.
- Delinear e implementar una interfaz digital que permita el ingreso y la visualización de cada uno de las variables y parámetros sensados por el equipo.
- Desarrollar un sistema de alarmas auditivas y de mensajes de alerta, que sean amigables con el usuario del equipo con el fin de prevenir posibles accidentes y desperdicios de reactivos.

1.1.7. ALCANCE

Con el desarrollo de esta tesis, se pretende dar un giro al desarrollo tecnológico del país. El diseño de equipos de última tecnología a bajo costo, con alta calidad y amigables con el medio ambiente, en el ámbito energético, beneficiando a todo el sector industrial.

Se pretende apoyar a los Institutos de Educación en sus investigaciones, especialmente relacionadas en el área de ciencias de la vida, con equipos

eficientes y de alta confiabilidad, para mejorar sus procesos internos que se presentan en las investigaciones de los laboratorios de Biotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Se realizará un equipo Hot-Plate, que permita el tratamiento de sustancias químicas en el área de cultivo vegetal en la rama de Biotecnología, de forma que se pueda usar para mezclar y calentar composiciones químicas, con el fin de disminuir los problemas que los equipos actuales presentan. El diseño contempla un sistema de adquisición de datos de temperatura y control difuso, de manera que permita monitorear y controlar el comportamiento de las variables involucradas en el proceso y proporcionar la eficiencia requerida para el equipo.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo contiene el fundamento teórico que sustenta el desarrollo del equipo; se profundizará cada tema que interviene en el diseño en las áreas relacionadas con la mecánica, electrónica y control.

De igual forma, se explicará términos importantes que se mencionarán en el diseño e implementación del equipo, permitiendo un mejor entendimiento de los conceptos para explicar los sistemas que intervienen en el mismo.

2.1.1. INSTRUMENTOS DE LABORATORIOS

Un laboratorio es el lugar equipado con los medios necesarios para llevar a cabo investigaciones, trabajos o experimentos, que pueden ser de carácter científico o técnico. El laboratorio debe de contar con el equipamiento y la infraestructura adecuada con el fin de realizar investigación, así mismo, es importante la ubicación del mismo (Roca, 1993).

Los laboratorios que tengan relación con la rama de la ciencia de biotecnología, deben de poseer instrumentos que permitan llevar a cabo estudios basados en la caracterización de los organismos vivos, además de tener un personal capacitado en diversos ámbitos como Biología Molecular o Cultivo de tejidos (Roca, 1993).

La biotecnología, como es de conocimiento mundial, es una de las ciencias que ha tenido un gran avance, ya que se ha logrado conseguir descubrimientos importantes que ayuda a la sociedad y el ecosistema mundial, por esta razón se requieren de laboratorios que ayuden a obtener resultados de excelencia en base a la práctica que se desarrolle.

Dentro de la instrumentación que se encuentran en un laboratorio de biotecnología, existen materiales y equipos básicos pertenecientes a cualquier tipo de laboratorio, también podemos encontrar instrumentos más complejos que permiten el desarrollo de técnicas y procedimientos a un nivel superior de investigación.

2.1.2. HOT-PLATE

Un Hot-Plate es un equipo portátil y autónomo cuyo objetivo es calentar recipientes con líquidos, y al mismo tiempo mezclarlos mediante un agitador magnético ubicado en la sustancia, influenciado por otro magneto colocado en el equipo (Figura 2.1). Estos equipos contienen resistencias eléctricas que permiten elevar la temperatura de diferentes sustancias.



Figura 2.1. Hot-Plate analógico de un plato

Su desarrollo se originó en la década de 1940, en donde Arthur Rosinger originario de Nueva Jersey (EEUU); registró su primera aplicación. La patente contenía una descripción detallada del funcionamiento de una barra magnética recubierta, influenciada por otro magneto colocado en una base por debajo de esta barra (EEUU Patente nº US2350534 A, 1944).

En la década de 1970, se desarrolló el primer Hot-Plate por Salvador Bonet de la compañía SBS, en donde se introdujo el sistema de rotación magnética, para poder agitar diferentes sustancias, encontrando una alternativa para que el mecanismo utilizado hasta esa época, sea más silencioso, al no tener que utilizar engranes para transmitir el movimiento. Una de las principales ventajas de este nuevo sistema de transmisión, es que se vuelve menos propenso a la contaminación por agentes externos, pues el equipo no tiene contacto directo con la sustancia (Girolami, Rauchfuss, & Angelici, 1999).

2.1.3. MEDIOS DE CULTIVO

El cultivo de tejidos, consiste fundamentalmente en tomar una porción de planta (explante) y aislarla; esta técnica se basa en proporcionarle artificialmente las condiciones físicas y químicas necesarias para que las células expresen su potencial intrínseco o inducido. En este proceso es importante tomar en cuenta procedimientos de asepsia y desinfección, para mantener los cultivos libres de contaminación microbiana (Roca, 1993).

Los principios para realizar medios de cultivo dependen de su aplicación y pueden presentar variaciones en procedimientos y métodos de asepsia, dependiendo de los objetivos de la investigación. La investigación en este tema tiene un amplio rango de actividades como por ejemplo: “La investigación básica sobre procesos bioquímicos y morfológicos de la diferenciación celular, *Propagación clonal*, o *Mejoramiento genético de las plantas*” (Roca, 1993).

Para realizar los medios de cultivo se requieren de diferentes equipos, materiales e instrumentos. Uno de estos equipos que permite mezclar y preparar el medio de cultivo es el Hot-Plate, este equipo evita que una persona tenga contacto directo con el medio de cultivo, obteniendo la solución libre de contaminación.

2.2. SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control han permitido el desarrollo de la tecnología en las últimas décadas, de manera especial en el sector industrial y de la manufactura automática. Un claro ejemplo de esto, es el uso de la manufactura por control numérico, en donde el control de la máquina permite realizar piezas muy complejas que se utilizan en el sector aeroespacial y automovilístico (Ogata, 1998).

La frase “Sistemas de control”, se compone de dos palabras con un significado amplio. Por una parte la palabra sistema se define como la combinación de varios componentes individuales que interactúan y se complementan uno entre otro, para lograr el funcionamiento óptimo de un proceso. Estos componentes pueden ser físicos o abstractos, dependiendo el área de conocimiento en el que se utilice el concepto (Ogata, 1998).

Por otra parte, la palabra control se debe entender como una estrategia desarrollada para obtener el funcionamiento correcto de un sistema. Por esta razón, se utilizan instrumentos que capten información sobre lo que está sucediendo en el proceso que se requiere controlar y otros dispositivos que permitan el procesamiento de las señales entregadas por estos instrumentos, que generen una metodología de control, para que el funcionamiento del sistema sea el requerido (Smith & Corripio, 1991).

2.2.1. RESEÑA HISTÓRICA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Desde inicios de la historia, la humanidad ha intentado entender los fenómenos naturales que lo rodean. La forma en la que el hombre ha intentado explicar estos fenómenos, ha permitido el desarrollado de su capacidad de emular, haciendo que se replique estos eventos y se encuentre una explicación a la mayoría de fenómenos existentes en el mundo, dando como

consecuencia su progresiva evolución en el conocimiento. La indagación del hombre ha generado que su conocimiento se desarrolle, planteándose como una de sus metas, controlar el funcionamiento de todo aquello que le rodea para facilitar y perfeccionar las actividades que realiza en su vida.

Debido a este interés, se desarrolla la teoría de control, cuyo objetivo es dominar el comportamiento deseado de cualquier proceso o sistema. Existen varios hechos que han marcado el desarrollo de los sistemas de control, y que han permitido los grandes avances tecnológicos que hoy en día podemos encontrar.

Es así que en el siglo XVIII, James Watt desarrolló un “Regulador de velocidad centrífugo” en una máquina de vapor, este trabajo fue de gran importancia, pues incentivó a otras personas a interesarse en la teoría de control. Por esta razón, en el siglo XX, los investigadores Minorsky, Hazen y Nyquist, entre otros colaboradores, se destacaron en el desarrollo de la teoría de control (Ogata, 1998).

Entre las investigaciones de Minorsky y Nyquist, se desarrolló la manera de analizar matemáticamente la estabilidad de un sistema. Minorsky, sostuvo que la estabilidad de un sistema podía ser analizado mediante matemática diferencial; años más tarde, Nyquist diseñó un procedimiento para analizar la estabilidad de un sistema en lazo cerrado a partir de la respuesta transitoria del sistema en lazo abierto. Hazen por su parte, en 1934, introdujo por primera vez el concepto de servomecanismo para el control de posición (Ogata, 1998).

En la década de los 40's, los métodos de respuesta en frecuencia de un sistema, permitieron el desarrollo de controles lineales en lazo cerrado. Desde fines de los años 50's, se ha puesto empeño en el desarrollo de sistemas que sean óptimos y que cumplan con el requerimiento de funcionamiento deseado (Ogata, 1998).

Debido a la evolución y desarrollo tecnológico a partir de la década de los 60's, la teoría de control clásica, con una entrada y una salida, pierde su tenacidad, a partir de la existencia de sistemas que funcionan con múltiples entradas y salidas. Este problema ha sido solventado gracias a la evolución creciente de las computadoras digitales, permitiendo el control de plantas de mayor complejidad con nuevas teorías de control que permiten robustez en los sistemas (Ogata, 1998).

2.2.2. TEORÍA DE SISTEMAS DE CONTROL

La palabra control se puede extender a diferentes campos de estudio en varias áreas de la ciencia. Por esta razón, se definirá al control, de forma general, como la búsqueda de alcanzar ciertos objetivos (Kuo, 1996).

En el área de la ingeniería, Kuo define a los sistemas de control como una herramienta que permite tomar decisiones con respecto al funcionamiento de un sistema, mediante ciertas estrategias de control (1996).

Smith y Corripio, afirman que el objetivo que persiguen los sistemas de control es mantener a las variables que intervienen en el proceso en determinados valores de operación. Esto se debe a que todos los procesos o sistemas tienen una naturaleza dinámica en su funcionamiento, y están propensos de sufrir cambios. De esta manera, el control permitirá tomar acciones correctivas para asegurar el óptimo y correcto funcionamiento del sistema (1991).

El control siempre estará acompañado de procesos, estos procesos son operaciones progresivas, sujetas a cambios graduales, consecuentes y controlados en un intervalo continuo de tiempo y pretenden obtener resultados específicos (Ogata, 1998).

Para entender sobre estas metodologías o estrategias de control, se requiere del análisis de los elementos que forman parte de los sistemas de control. Por esta razón, se definirá cada uno de estos elementos para poder diseñar un control óptimo en un sistema y se clarificará ciertos términos, que se usarán en el desarrollo de los siguientes capítulos.

2.2.2.1. ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Según Kuo, existen tres componentes básicos que forman parte de todo sistema control (1996):

- ***Objetivos de control***

Se definen como todo aquello que se necesita obtener como resultado en el sistema. Propiamente, estos objetivos deben estar en la entrada del sistema de control, para indicar todo aquello que se pretende obtener después de que los componentes del sistema interactúen. Los objetivos de control en un sistema pasan a ser llamados como entrada de referencia o *set point*, cuyo valor es el requerido en el proceso (Kuo, 1996).

- ***Sistema de control***

Es el conjunto de señales, mecanismos y elementos lógicos que mediante su interacción permiten obtener el objetivo trazado en el inicio del control. La eficacia del control depende de la interacción correcta de cada uno de los elementos que intervienen en el control (Kuo, 1996).

- ***Resultados del control***

Es todo lo que se obtiene al aplicar las estrategias de control en los requerimientos iniciales impuestos al sistema de control, visto de otra manera, implica el funcionamiento que tiene el sistema después de haber sido

controlado. El resultado se encuentra a la salida del sistema y es el último elemento que lo conforma (Kuo, 1996).

En la Figura 2.2, se puede observar la sinergia e interacción correcta de los tres componentes descritos con anterioridad, lo que permite el buen funcionamiento de un sistema, siempre y cuando el control diseñado sea el adecuado para el proceso.

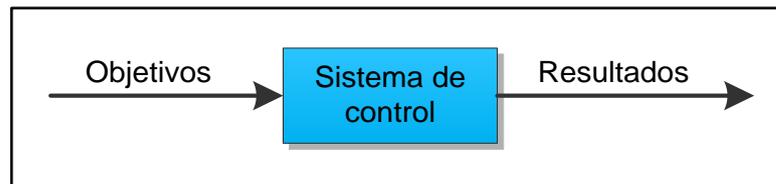


Figura 2.2. Componentes básicos de un sistema de control

Fuente: (Kuo, 1996)

Lo que Ogata sostiene, es que los sistemas de control se conforman por varios elementos: planta de control, controlador, variable manipulada, variable controlada, entre otros (1998):

- ***Planta***

Es también conocida como sistema a controlarse. Una planta puede ser un proceso, una parte de un equipo que se desea controlar, o a su vez, puede abarcar a la composición de varias partes del equipo o sistema. La planta de control tiene un objetivo determinado, que se basa en el cumplimiento de una tarea en particular (Ogata, 1998).

- ***Controlador***

Existen varios tipos de tecnología que se utilizan para controlar el funcionamiento de los sistemas. De forma general, un controlador se define como un conjunto de elementos físicos y lógicos que permiten regular el funcionamiento de un sistema (Phillips & Harbor, 1996).

Para otros autores como es el caso de Smith y Corripio, el controlador es la parte fundamental del sistema de control, pues constituye el cerebro que ordena y dirige el funcionamiento de cada evento que la planta va a realizar (1991).

En un inicio, los controladores estaban basados en amplificadores operacionales, uniones mecánicas, filtros u otros elementos de control analógico, que bajo un cierto diseño lograban compensar las señales que ingresaban, mediante arreglos matemáticos y lógicos, generando de esta forma una metodología de control bajo una cierta planta (Kuo, 1996).

En la actualidad, el gran avance tecnológico a nivel mundial ha permitido satisfacer la demanda de controladores más robustos, para plantas de gran complejidad, debido a la disponibilidad y facilidad de uso que brinda las computadoras digitales (Ogata, 1998).

- ***Variable controlada***

Es la cantidad o condición que se mide y se toma como punto inicial para el control. La variable controlada generalmente es la salida del sistema, es decir, el resultado del proceso de control (Ogata, 1998).

- ***Variable Manipulada***

Es también conocida como señal de control y se define como la cantidad o condición que el controlador altera, para de esa manera afectar al estado de la variable controlada. La variable manipulada representa la salida del sistema de control y afecta de forma directa al funcionamiento del proceso (Ogata, 1998).

- **Controlar**

En el área de ingeniería, quiere decir: “Medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado” (Kuo, 1996).

- **Perturbaciones**

Son señales que perjudican al funcionamiento correcto del sistema afectando a las señales de control. Las perturbaciones pueden ser provocadas por fenómenos electrónicos o físicos, que pueden estar dentro o fuera del sistema. Las perturbaciones cuyo origen están dentro del sistema se denominan perturbaciones internas, mientras que las perturbaciones que tienen origen por agentes externos del sistema se denominan perturbaciones externas.

Los elementos de control interactúan generalmente como se observa en la Figura 2.3, en donde se puede entender de mejor manera la importancia de cada elemento en el sistema de control.

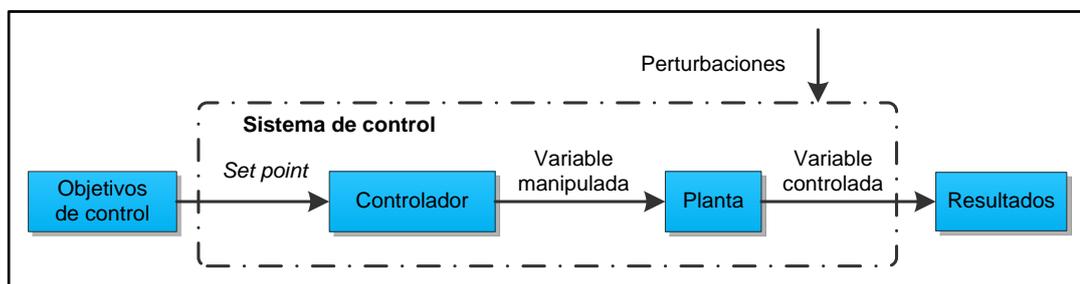


Figura 2.3. Componentes de un sistema de control

2.2.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control pueden clasificarse en varios tipos dependiendo de: su realimentación, su linealidad, el número de entradas y salidas que posee el sistema, entre otras características.

- ***Según su realimentación***

La realimentación en un sistema es una metodología de control, en donde el controlador puede verificar el cumplimiento de la estrategia de control implementada (Smith & Corripio, 1991).

Un sistema realimentado mantiene una relación entre la variable controlada y el *set point*, comparando a estos elementos del control y usando esta diferencia, llamada error, de forma que el controlador modifique a la variable manipulada (Ogata, 1998).

La verificación de la acción de control es realizada mediante instrumentos que adquieren esta información, conocidos como sensores, encargados de la transducción de la señal física que se obtiene en la salida del sistema, a una señal generalmente electrónica que pueda entender el controlador (Phillips & Harbor, 1996).

Los sistemas a partir de su realimentación pueden clasificarse en sistemas de control en lazo abierto o sistemas de control en lazo cerrado:

- ***Sistemas de control en lazo Abierto***

Los sistemas de lazo abierto, son aquellos sistemas cuya variable controlada, no necesita ser verificada por un sensor presente en la salida del sistema, después de haberse aplicado el control. Es así que, en un sistema

de este tipo, se pueden encontrar los elementos de control como se muestra en la Figura 2.4 (Kuo, 1996).

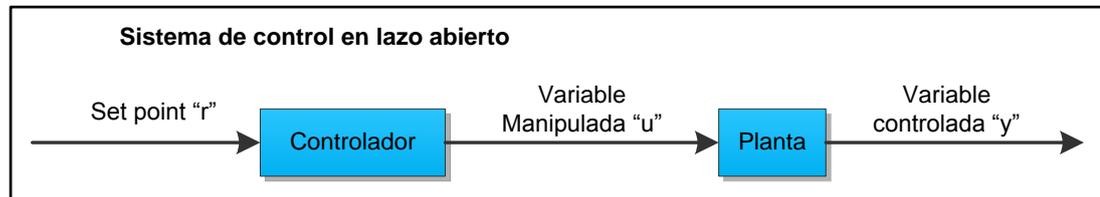


Figura 2.4. Elementos del control en lazo abierto

Fuente: (Kuo, 1996)

Existe gran variedad de sistemas en la ingeniería, que requieren de mayor o menor precisión, dependiendo el proceso y la variable que se desee controlar. En función de la complejidad del sistema, el no tener realimentación implica que exista menor exactitud, debido a la posible presencia de perturbaciones en el funcionamiento del proceso. A pesar de eso, existen sistemas en lazo abierto que funcionan de manera correcta, pues en muchos de los casos es aceptable que la variable controlada pueda estar en un rango operativo entre valores limitantes (Kuo, 1996).

En cualquier sistema en lazo abierto, al no existir la comparación entre la entrada de referencia y la variable controlada, la precisión en el funcionamiento del sistema depende de la correcta calibración del controlador (Ogata, 1998).

- ***Sistemas de control en lazo cerrado***

Son sistemas que poseen realimentación entre la salida del sistema hacia la entrada del sistema y que permite la verificación de la variable controlada con respecto a la entrada de referencia (Kuo, 1996).

Según Kuo, la importancia de los sistemas en lazo cerrado radica en la precisión del control en el funcionamiento del sistema, debido a que la señal de control es proporcional al error existente entre el *set point* y la variable

controlada como se puede observar en la Figura 2.5; también se puede apreciar los elementos que componen a este tipo de sistemas. Un sistema que posee realimentación es más exacto, pues intenta que este error se aproxime a cero (1996).

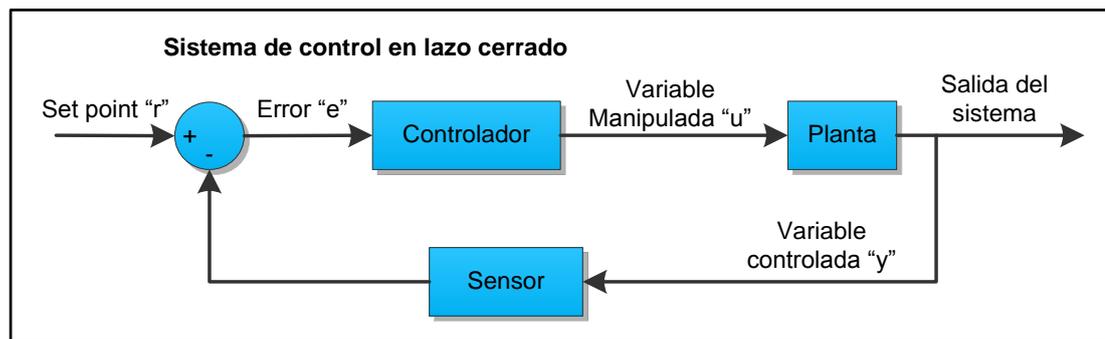


Figura 2.5. Elementos del control en lazo cerrado

Fuente: (Phillips & Harbor, 1996)

Por esta razón, es una de las metodologías más usada en el control, debido a que reduce el efecto de las perturbaciones y ruidos en el sistema, pues se basa en la reducción de cualquier tipo de error (Ogata, 1998).

Los ruidos pueden ser señales electrónicas no deseables, producto de campos magnéticos u otros fenómenos que afecten a las señales de control. De la misma manera, existe ruido mecánico que puede afectar al sistema, como vibraciones, calentamiento excesivo de los componentes electrónicos, entre otros. Otra ventaja de tener un lazo cerrado, es que el sistema se vuelve menos vulnerable a ruidos que pueden afectar a las señales de control (Kuo, 1996).

Así mismo, la realimentación reduce la sensibilidad del sistema impidiendo que sea afectado por factores externos, como cambios físicos que pueden ser de vital importancia en el buen funcionamiento del sistema. Existen muchos casos que al variar parámetros, como la temperatura del medio ambiente, ocasiona que el sistema funcione de diferente forma a la esperada. El lazo

cerrado permite que este malfuncionamiento que se presenta, sea corregido por el control (Kuo, 1996).

- **Según su linealidad**

Esta clasificación se refiere al comportamiento que se obtiene en la salida del sistema. Un sistema puede clasificarse según su linealidad en dos tipos: lineales y no lineales (Kuo, 1996).

- **Sistemas Lineales**

Según Kuo, los sistemas lineales no existen en la práctica, pues todos los sistemas físicos tienen características no lineales aunque sean mínimas. En los sistemas lineales, las señales están limitadas en intervalos, en los cuales, los componentes del sistema poseen una característica o respuesta lineal debida a señales entrantes. El manejo de estos sistemas se lo realiza mediante fórmulas matemáticas, que no exigen complejidad (1996).

- **Sistemas no Lineales**

Según Kuo, los sistemas no lineales son los que más abundan en el mundo. Se habla de un sistema no lineal, cuando los valores de las señales se encuentran fuera del rango de linealidad, es decir, que no se puede representar al sistema median una ecuación matemática simple. Estos sistemas presentan un manejo más complejo que los sistemas lineales, debido a que no existe una metodología precisa para tratarlos. Generalmente, estos sistemas son controlados por métodos probabilísticos (1996).

- **Según el número de entradas**

Un sistema puede tener una o varias referencias en la entrada, al igual que varias salidas de control. Según esta clasificación los sistemas pueden ser *SISO* o *MIMO*.

- **Sistemas tipo SISO**

Son aquellos sistemas que poseen una sola entrada en la referencia de control y una sola salida como acción de control. Su nomenclatura se debe a su traducción del inglés: “*Simple-input; simple-output*”. En la Figura 2.6 se puede observar un sistema *SISO*.

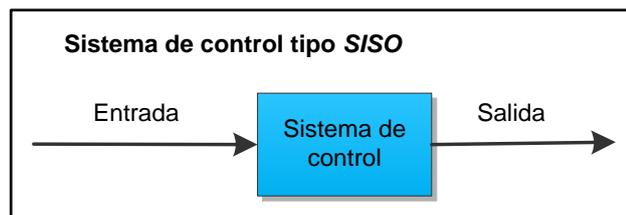


Figura 2.6. Diagrama de control de un sistema *SISO*

- **Sistemas tipo MIMO**

Son sistemas que poseen múltiples entradas y salidas. Su nomenclatura se debe a su traducción del inglés: “*Multiple-input; multiple-output*”. En la Figura 2.7 se puede observar un sistema *MIMO*.

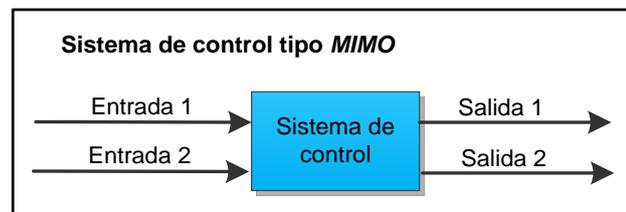


Figura 2.7. Diagrama de control de un sistema *MIMO*

2.3. SISTEMAS DE CONTROL DIFUSO

2.3.1. INTRODUCCIÓN

El control difuso (*fuzzy logic control*) o control borroso, se basa en la lógica difusa introducida por Lotfi Zadeh (1965), quien afirma que: “A medida que la complejidad de un sistema aumenta, la capacidad del ser humano para hacer declaraciones precisas y significativas sobre su comportamiento disminuye

hasta alcanzar un umbral más allá del cual la precisión y la importancia se vuelven mutuamente características exclusivas". De esta manera, asegura que: "Cuanto más cerca se mira a un problema del mundo real, más borrosa se convierte su solución" (Reznik, 1997).

El desarrollo de esta teoría se fundamenta en un método de razonamiento lógico inteligente menos estricto y más sencillo de elaborar. La lógica difusa permite valores intermedios para definir valores convencionales como si o no, verdadero o falso, negro o blanco, entre otros. A partir de esta lógica, estos valores se convierten en variables como: "más caliente" o "menos frío", que se formulan de forma matemática (Bauer, Nouak, & Winkler, 1996).

El control difuso mundialmente se implementa en 1991, cuando las investigaciones de la lógica difusa salen de los laboratorios y se convierte en una herramienta industrial (Reznik, 1997).

A pesar de que la lógica difusa fue creada en Estados Unidos, el crecimiento en la implementación de aplicaciones de control difuso se ha extendido en Japón. En la actualidad, Estados Unidos y algunos países Europeos, han empezado a implementar varias aplicaciones con esta metodología. La NASA por ejemplo, ha introducido la lógica difusa en proyectos para el complejo proceso de maniobras de acoplamiento (Bauer, Nouak, & Winkler, 1996).

2.3.2. TEORÍA DE CONTROL DIFUSO

En la teoría de control tradicional, es necesario modelar a la planta o sistema, para poder diseñar un controlador óptimo y de esa manera obtener los resultados requeridos. Por otro lado, en el control difuso no se necesita de una ecuación matemática que represente a la planta o sistema, por esta razón, la implementación de controladores con esta lógica, permite controlar plantas de mayor complejidad cuyo modelamiento matemático se dificulta (Reznik, 1997).

Otra ventaja de implementar lógica difusa en comparación de la utilización de la lógica convencional, es que se puede usar información que no es exacta, mientras que en la lógica convencional, la información siempre debe ser definida y precisa. Esto permite que el control sea flexible y más robusto (Ramírez Ramos, 2008).

Este tipo de control, es un método inteligente y de gran importancia cuando se puede usar reglas de control, representadas de manera lingüística mediante el conocimiento del sistema por parte del diseñador del controlador (Chan & Shi, 2011).

La lógica difusa trata de imitar la lógica del ser humano, introduciendo variables lingüísticas al asociarlas con funciones de pertenencia que toman valores entre 0 y 1, a diferencia del control convencional, que se basa en la lógica booleana y únicamente toma valores verdaderos o falsos (1 ó 0). A esta asociación se la conoce como fusificación (Ånström & Hägglund, 2009).

En muchos casos, después del análisis de la factibilidad de desarrollar un controlador difuso, para ser implementado, se utilizan elementos que trabajan mediante lógica binaria, por esta razón después del control, los resultados deben ser defusificados, para ser entendidos como valores reales. De esta manera las variables lingüísticas utilizadas en la entrada del control, pasan a ser valores reales y que la salida del sistema de control difuso puede asimilar (Reznik, 1997).

2.3.2.1. ELEMENTOS DEL CONTROL DIFUSO

Existen varios conceptos y elementos que necesitan ser definidos para poder diseñar un control difuso. Estos elementos se nombran a continuación:

- **Conjuntos difusos y funciones de membresía**

Un conjunto difuso (fuzzy set), es una agrupación de elementos que reúnen características de asociación similares. De forma matemática, un conjunto difuso [A], perteneciente al universo [U], es un conjunto de pares ordenados de un elemento genérico [u] con su respectivo grado de membresía [$\mu_A(u)$] (Membership) (Reznik, 1997):

$$A = \{[u, \mu_A(u)] / u \in U\} \quad \text{Ec. 2.1}$$

En el control, los conjuntos difusos son representados por *funciones de membresía* (Figura 2.8), que corresponde a la agrupación de elementos caracterizados por una etiqueta que los distingue entre uno y otro (Reznik, 1997).

Los elementos que se analizan en el control difuso pueden tener un cierto porcentaje de pertenencia en el conjunto difuso, e incluso pueden pertenecer a dos o más conjuntos a la vez. A esta pertenencia se conoce como *grado de membresía* (Figura 2.8). En el control convencional, los elementos analizados solamente pueden pertenecer o no al conjunto, siendo el valor de pertenencia 0 ó 1 (Reznik, 1997).

Como se observa en la Figura 2.8, el grado de membresía, en un plano ordenado, es caracterizado sobre el eje ordenado y el universo tratado se ubica en el eje de las abscisas.

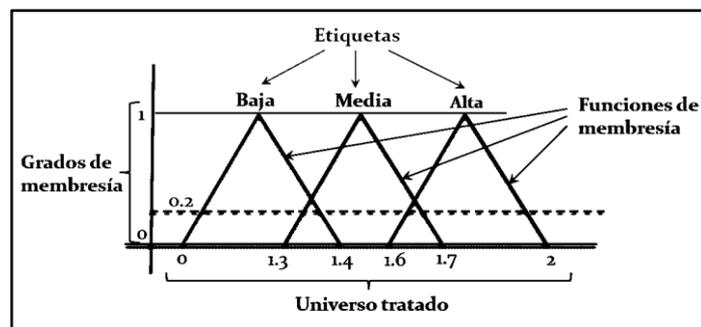


Figura 2.8. Elementos principales de un sistema difuso

Fuente: (Lara, 2013)

Por ejemplo, cuando se trata de la edad en personas, se puede definir un conjunto que comprenda edades de 0 a 100 años, este conjunto sería el universo tratado. A su vez, se puede dividir en varios subconjuntos, agrupando edades características. Un subconjunto podría comprender edades entre 0 a 20 años y podría recibir la etiqueta de *Edad joven* (Reznik, 1997).

Como se observa en la Figura 2.9, existen diferentes formas de funciones de pertenencia, las más utilizadas son:

- Lineal por tramos (triangular y trapezoidal)
- Cuadrática
- Gaussiana de acuerdo con la fórmula: $\mu(x) = \exp(-((x - \mu) / \sigma)^2)$
- Algunas funciones especiales

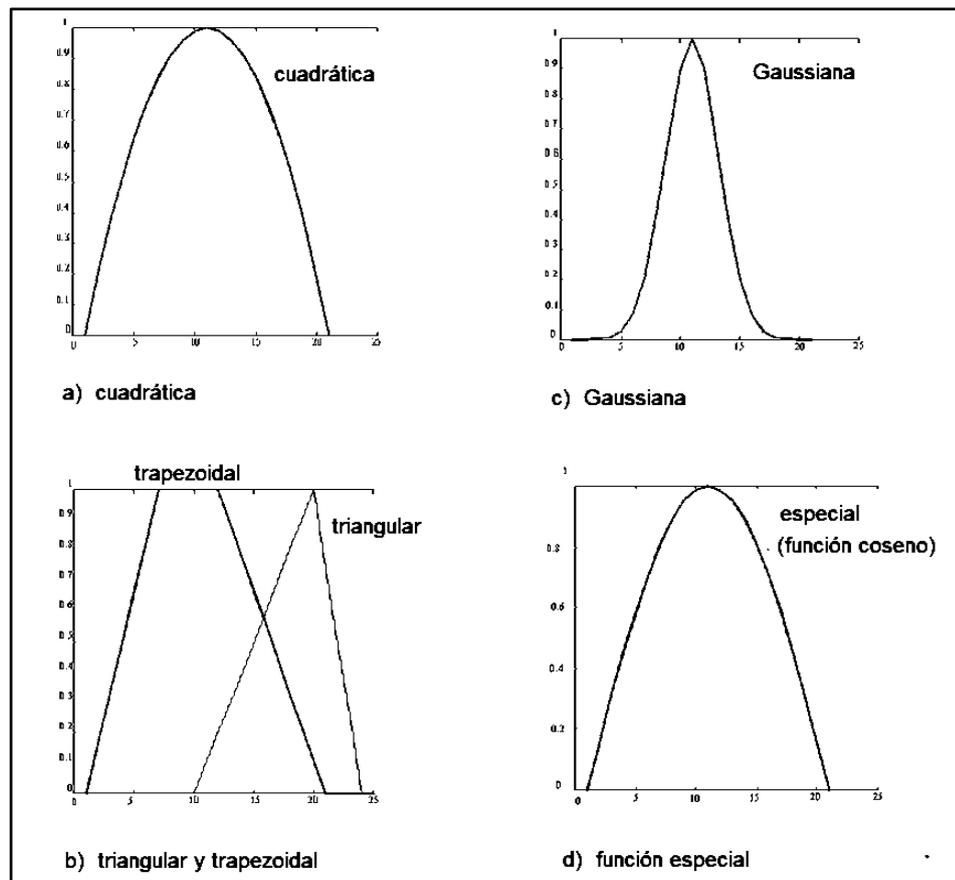


Figura 2.9. Formas de funciones de pertenencia más utilizados

Fuente: (Reznik, 1997)

Aún no existe una manera teórica de elegir la mejor función de pertenencia para una aplicación. La mayoría de investigadores realizan diferentes análisis para ver la mejor respuesta según la aplicación a controlar. Las funciones lineales por tramos (triangular y trapezoidal), son las más utilizadas en el diseño de controladores, pues presentan mayor simplicidad cuando se necesita predecir y calcular la salida del control difuso (Reznik, 1997).

- ***Variables lingüísticas y fusificación***

Las variables lingüísticas son expresiones del lenguaje natural, que representan a la variable de análisis en la cual se aplicará la acción de control. A diferencia del control convencional, en donde el valor que adopta la variable es una cantidad numérica, en el control difuso, el valor que adquiere una variable lingüística es una palabra o expresión correspondiente a una etiqueta que representa a un conjunto difuso (Reznik, 1997).

La fusificación es el proceso en donde se representa, mediante una función de pertenencia, a una cantidad que carece de nitidez y que puede contener cierta ambigüedad. La entrada del controlador difuso, siempre será un valor, generalmente el error calculado a partir del lazo cerrado del sistema. Este valor es fusificado para generar posteriormente acciones de control (Ross, 2004).

Por ejemplo, cuando se quiere controlar la temperatura, la variable lingüística sería *temperatura*, mientras los valores de pertenencia que puede adquirir esta variable podrían ser: *alta*, *media* y *baja*.

El concepto de fusificación permite que la variable controlada pase a tener un grado de pertenencia en uno o más funciones de membresía como se puede observar en la Figura 2.10, en donde la variable lingüística “Voltaje” posee dos tipos de fusificación, con dos grados de pertenencia diferentes, debido a la existencia de un mayor número de funciones de membresía (Ross, 2004).

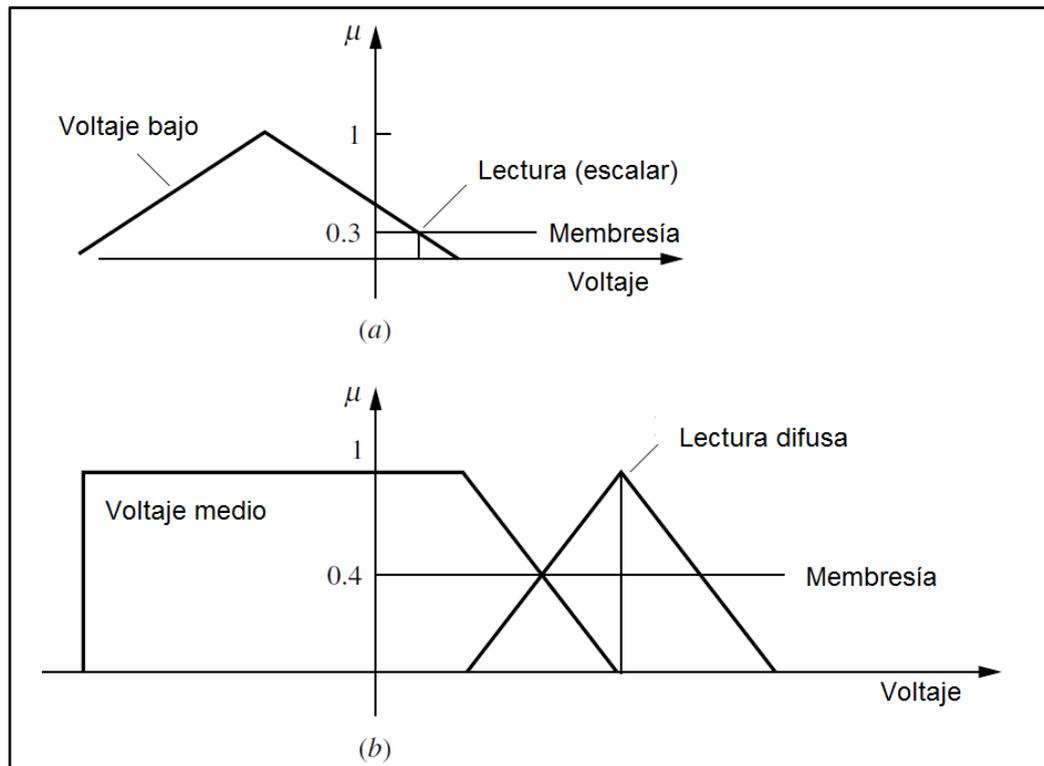


Figura 2.10. Grados de fusificación en función del número de funciones de membresía

Fuente: (Ross, 2004)

- **Reglas difusas**

Las reglas difusas son utilizadas para describir, en términos lingüísticos, una relación cualitativa entre dos o más variables. En forma matemática, representan la relación que mantienen los conjuntos difusos existentes. Cuando se realiza un controlador, entre la entrada y la salida deben existir un cierto número de relaciones que permitan generar acciones de control (Reznik, 1997).

De manera general, las reglas de fusificación se realizan de forma condicional: *Si A entonces B*, en donde *A* representa a la entrada y *B* representa a la salida o acción de control del sistema. Como se puede observar en la

Tabla 2.1, para realizar un controlador, se debe tabular las reglas de fusificación que lo componen (Reznik, 1997).

Tabla 2.1

Tabulación de las reglas de fusificación

Forma canónica de un sistema basado en reglas difusas	
Regla 1:	SI la condición C^1 , ENTONCES la restricción R^1
Regla 2:	SI la condición C^2 , ENTONCES la restricción R^2
⋮	
Regla r :	SI la condición C^r , ENTONCES la restricción R^r

Fuente: (Ross, 2004)

El diseñador del sistema de control difuso, debe conocer la relación entre las variables de entrada y salida para poder diseñar el controlador. En este proceso se fundamenta el correcto funcionamiento del controlador difuso (Reznik, 1997).

- **Defusificación**

La defusificación es un proceso en el que se convierte una cantidad difusa a una cantidad escalar precisa. Esto se debe a que en un proceso de control, los dispositivos funcionan con cantidades precisas y no con variables lingüísticas ni funciones de membresía (Ross, 2004).

La salida del control difuso puede ser la unión lógica de dos o más funciones de pertenencia, definidas en el universo tratado de la variable de salida. Como se observa en la Figura 2.11, la salida del sistema (c) se encuentra a partir de la unión de una función de membresía triangular (a) y de una función de membresía trapezoidal (b) (Ross, 2004).

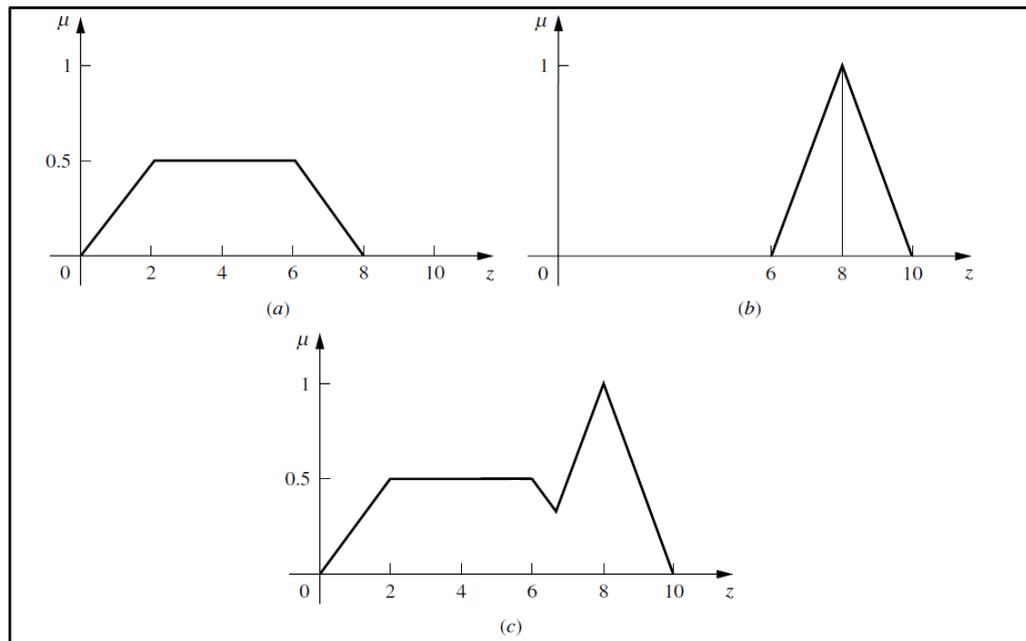


Figura 2.11. Salida de un sistema de control difuso

Fuente: (Ross, 2004)

Existen varios métodos matemáticos utilizados en el proceso de defusificación, algunos de ellos son: el método del valor máximo de membresía, el método del centroide, el método del peso promedio, entre otros. El método más usado en el control por lógica difusa es del centroide (Ross, 2004).

El método del centroide es el más empleado debido a su simplicidad en el cálculo matemático. Muchos de los simuladores utilizados por los diseñadores se basan en el método del centroide como proceso de defusificación. Este método responde a la ecuación Ec. 2.2.

$$z^* = \frac{\int u_c(z) \cdot z \, dz}{u_c(z)} \quad \text{Ec. 2.2}$$

En la Figura 2.12, se puede observar que el principio de este método, es el cálculo del centro de gravedad de los conjuntos difusos que intervienen en la salida del controlador (Ross, 2004).

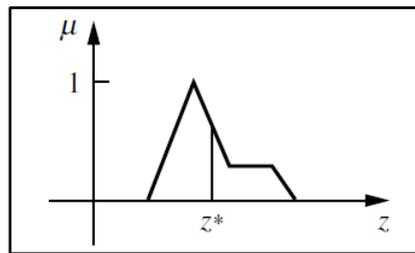


Figura 2.12. Defusificación mediante el método del centroide

Fuente: (Ross, 2004)

2.3.2.2. CONTROLADORES DIFUSOS

La operación de un controlador difuso depende de tres aspectos importantes, iniciando con el proceso de fusificación, seguido por el procesamiento difuso que relaciona la entrada y la salida del sistema mediante las reglas difusas y finalmente, el proceso de defusificación. La relación de estos tres componentes es conocida como motor de interferencia (Reznik, 1997).

En la Figura 2.13, se observa cómo interactúan los componentes del motor de interferencia, haciendo posible la operación del controlador difuso.

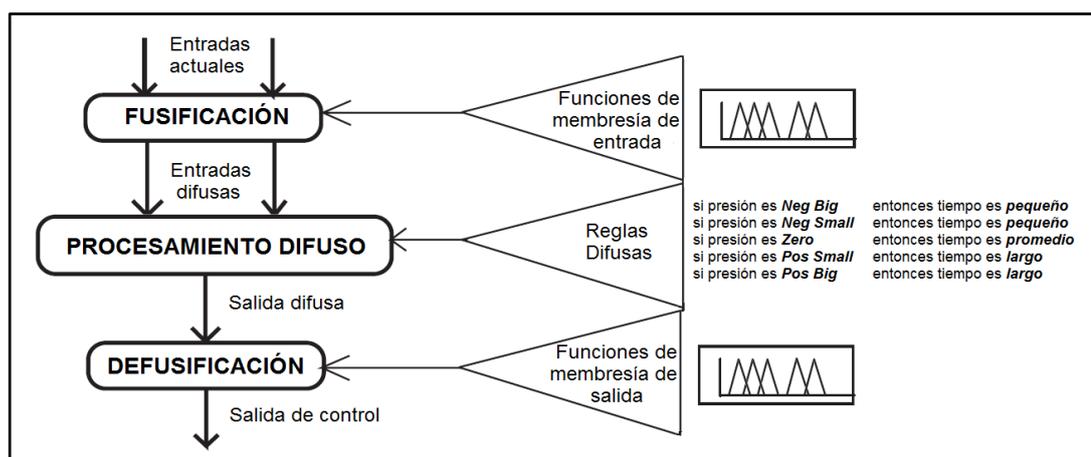


Figura 2.13. Motor de interferencia de un controlador difuso

Fuente: (Reznik, 1997)

Para diseñar un controlador difuso, no solo se deben escribir reglas para su funcionamiento, existen algunos aspectos que se deben considerar para el diseño correcto del controlador (Reznik, 1997):

- Definir las entradas del sistema y las variables de control. Esto implica, determinar cuál es el estado de proceso y las acciones de control que se deben implementar, a partir de la observación del sistema.
- Definir la interfaz de condiciones, de manera que se fije el modo en que la observación del proceso sea expresado mediante conjuntos difusos.
- Diseñar las reglas de fusificación, determinando las normas que deben ser aplicadas respecto a las condiciones de la entrada.
- Diseñar la unidad computacional de control capaz de procesar los datos que se obtienen del proceso mediante algoritmos, generando salidas difusas.
- Determinar una metodología que permita la transformación de las acciones de control de la salida difusa en cantidades precisas de control.

En la Figura 2.14, se puede observar la estructura típica de un controlador difuso.

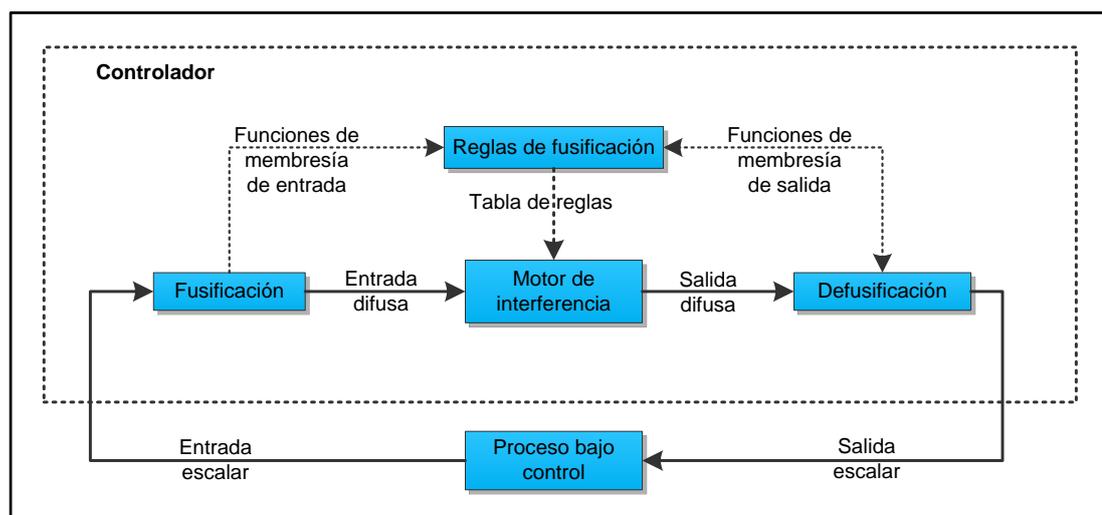


Figura 2.14. Estructura típica de un controlador difuso

Fuente: (Reznik, 1997)

Al igual que en los sistemas de control tradicionales, los controladores difusos pueden trabajar en lazo abierto o en lazo cerrado, dependiendo de la rigurosidad del control que se requiere implementar (Reznik, 1997).

En un sistema de control difuso en lazo abierto, no existe un dispositivo que permita el sensado de la respuesta del proceso, después de que se ha ejecutado la acción de control sobre el sistema. En la Figura 2.15, se observa la estructura básica de un controlador difuso en lazo abierto, con sus respectivos componentes (Ross, 2004).

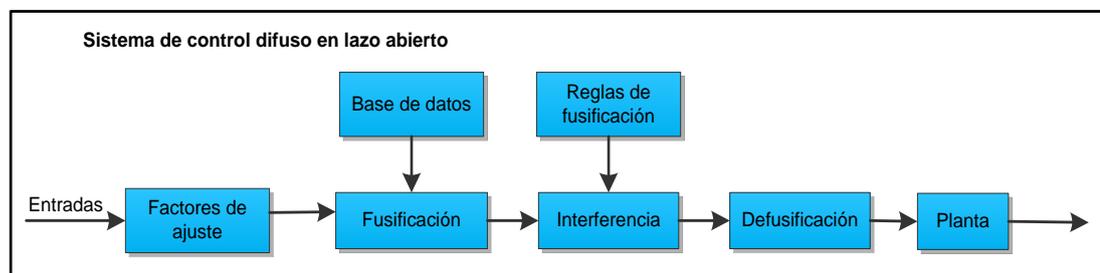


Figura 2.15. Estructura de un controlador difuso en lazo abierto

Fuente: (Ross, 2004)

En cambio, en un sistema de control en lazo cerrado, existe la realimentación del estado del proceso con respecto a la acción de control que se ha ejecutado. En la Figura 2.16, se observa la estructura de un controlador difuso en lazo cerrado y sus componentes (Ross, 2004).

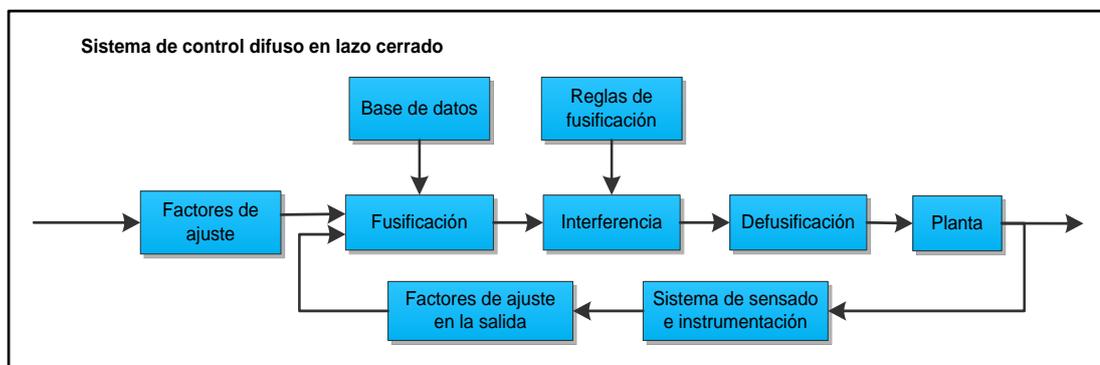


Figura 2.16. Estructura de un controlador difuso en lazo cerrado

Fuente: (Ross, 2004)

2.4. SISTEMAS MECÁNICOS

2.4.1. TERMODINÁMICA Y TRASFERENCIA DE CALOR

La transferencia de energía se produce desde el medio que posee mayor temperatura, hacia el medio que posee menor temperatura, donando energía hasta que los dos sistemas estén en equilibrio térmico (Cengel & Ghajar, 2011).

Cengel y Ghajar, afirman que un análisis termodinámico expresa cuanto calor se debe transferir para que los medios involucrados estén en equilibrio, con el objetivo de realizar un cambio de estado específico, y de esa manera, satisfacer el principio de conservación de la energía (2011).

Las leyes de la termodinámica rigen el análisis de la transferencia de calor. La primera ley de la termodinámica, detalla la igualdad de la razón de transferencia de energía y la razón de incremento de la energía en un sistema. La segunda ley postula que el calor se trasfiere en la dirección de la temperatura decreciente (Cengel & Ghajar, 2011).

Para exista transferencia de calor, es necesario la presencia de un diferencial de temperatura entre los medios. Es imposible realizar la transferencia neta de calor entre dos o más medios que están en equilibrio térmico. Esta diferencia de temperatura, es la fuerza que impulsa la transferencia de calor (Cengel & Ghajar, 2011).

La transferencia de calor es importante en el diseño de diversos equipos, cuyo funcionamiento están sometidos a cambios térmicos. Se puede destacar: los radiadores de los automóviles, los colectores solares, entre otros (Cengel & Ghajar, 2011).

2.4.1.1. TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

La energía se puede transferir a una masa existente o de la masa a otro sistema, por medio de dos mecanismos: calor $[Q]$ y trabajo $[W]$. Cuando existe una interacción energética, cuya fuerza impulsora es un diferencial de temperatura se denomina transferencia de calor, en caso contrario, se denomina como trabajo (Cengel & Ghajar, 2011).

Cengel y Ghajar argumentan, que se denomina a la energía “ t ” como calor y a la transferencia de energía térmica, como transferencia de calor. “ Q ” es la cantidad de calor transferido durante un proceso. La derivada del calor con respecto al tiempo, se denomina como razón de transferencia de calor $[\dot{Q}]$ y expresa la cantidad de calor transferida por unidad de tiempo (2011).

La unidad en la que velocidad de transferencia de calor $[\dot{Q}]$ se expresa es $[J/s]$, lo que es equivalente al trabajo $[W]$. Cuando se conoce la razón de transferencia de calor, se puede determinar la cantidad total de transferencia de calor $[Q]$ durante un intervalo de tiempo $[\Delta t]$, como se expresa en la ecuación Ec. 2.3 (Cengel & Ghajar, 2011).

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad (J) \quad \text{Ec. 2.3}$$

Para el caso donde \dot{Q} es constante, la ecuación Ec. 2.3 se simplifica a la Ec. 2.4.

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (J) \quad \text{Ec. 2.4}$$

La razón de transferencia de calor por unidad de área perpendicular a la dirección de esa transferencia se la conoce como flujo de calor $[\dot{q}]$, representada por la ecuación Ec. 2.5 (Cengel & Ghajar, 2011).

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde A , es el área de transferencia de calor.

2.4.1.2. PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

“El cambio neto (aumento o disminución) en la energía total de un sistema en el curso de un proceso, es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de ese proceso” (Cengel & Ghajar, 2011).

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía total} \\ \text{que entra en el} \\ \text{sistemas} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energía total} \\ \text{que sale del} \\ \text{sistemas} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la} \\ \text{energía total} \\ \text{del sistema} \end{array} \right) \quad \text{Ec. 2.6}$$

La energía se puede transferir hacia un sistema, o fuera de él, por medio de calor, trabajo y flujo de masa; el balance de energía para un sistema que pasa por cualquier proceso de cambio energético, se puede expresar como la ecuación Ec. 2.7 (Cengel & Ghajar, 2011).

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sistema} (J) \quad \text{Ec. 2.7}$$

Cengel y Ghajar afirman, que la energía es una propiedad y el valor de una propiedad no varía, siempre que se mantenga el estado del sistema. Por esta razón, se puede concluir que el cambio de energía en estas condiciones es cero ($\Delta E_{sistema} = 0$). Se dice que un proceso es estacionario, cuando el estado del sistema no cambia durante el proceso energético. El balance de energía de un proceso estacionario en donde la razón de transferencia de energía hacia un sistema, es igual a la razón de transferencia de energía hacia afuera de ese sistema, se muestra en la Figura 2.17 (2011).

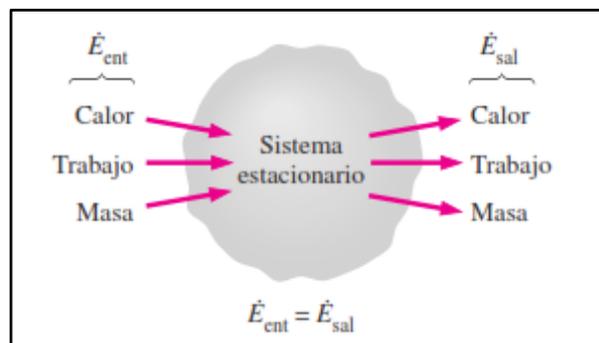


Figura 2.17. Sistema energético en operación estacionaria

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

2.4.1.3. BALANCE DE ENERGÍA EN LA SUPERFICIE

Una superficie no contiene volumen, por lo tanto no posee masa, en conclusión, tampoco posee energía. Debido a esta razón, para el análisis energético, una superficie se conceptualiza como un sistema ficticio, con un contenido de energía que permanece constante durante un proceso (Cengel & Ghajar, 2011).

Esta deducción es utilizada para condiciones estacionarias y transitorias, haciendo que el balance de energía en la superficie, no tenga generación de calor, sino únicamente, transferencia de energía. Como se puede apreciar en la Figura 2.18, en donde, \dot{Q}_1 representa a la conducción a través de la pared a la superficie, \dot{Q}_2 es la convección del valor de la superficie hacia el aire del exterior y \dot{Q}_3 es la radiación neta de la superficie hacia los alrededores (Cengel & Ghajar, 2011).

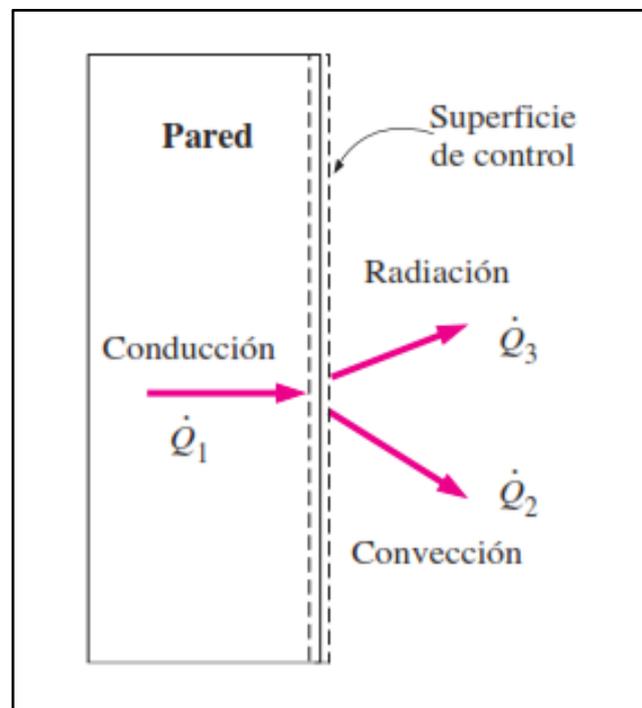


Figura 2.18. Interacciones energéticas en la superficie exterior de la pared de una casa

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

2.4.1.4. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de energía, en este caso, en forma de calor, se produce del medio que posee la temperatura más alta, hacia el de temperatura baja, esta transferencia se detiene en el momento en que los dos medios alcanzan la igualdad de temperatura (Cengel & Ghajar, 2011).

El calor se puede transferir de tres maneras diferentes: conducción, convección y radiación. Estos modos de transferencia de calor necesitan siempre la existencia de un diferencial de temperatura (Cengel & Ghajar, 2011).

2.4.1.5. CONDUCCIÓN

“La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia, hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas” (Cengel & Ghajar, 2011).

La conducción se puede observar en sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción es causada por colisiones y por difusión de moléculas en movimiento aleatorio. En los sólidos la causa de la conducción es la combinación de vibraciones entre las moléculas de una red y los electrones libres que transportan energía (Cengel & Ghajar, 2011).

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio, es directamente proporcional a la configuración geométrica del medio, a su espesor y al material del que está constituido. Cengel & Ghajar concluyeron, que la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de la misma y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa, como se observa en la ecuación Ec. 2.8 (2011):

$$\begin{aligned} & \text{Razón de conducción del calor} \\ & \propto \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{espesor}} \end{aligned} \quad \text{Ec. 2.8}$$

De forma matemática la Ec. 2.8 se expresar como la ecuación Ec. 2.9,

$$Q_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, que es la capacidad de un material para conducir calor (Cengel & Ghajar, 2011).

2.4.1.6. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

“La conductividad térmica de un material se define, como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material, por unidad de área, por unidad de diferencia de temperatura” (Cengel & Ghajar, 2011).

Por lo tanto, la conductividad térmica de un material es la forma de expresar la capacidad que tiene un material para conducir calor. Un valor elevado de conductividad térmica, significa que el material es un buen conductor de calor, al contrario, un valor bajo de este factor, significa que es un mal conductor o un aislante térmico. En la (Cengel & Ghajar, 2011).

En la Tabla 2.2, se muestran las conductividades térmicas de los materiales más utilizados a temperatura ambiente.

Tabla 2.2

Conductividades térmicas de materiales a temperatura ambiente

Material	k, W/m · °C*
Diamante	2300
Plata	429

CONTINÚA →

Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Acero Inoxidable	16
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.607
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

*Multiplíquese por 0.5778 para convertir a Btu/h-ft²·°F.

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Es posible calentar una capa de material de espesor y área conocidos, en uno de sus lados, utilizando un calentador de resistencia eléctrica de potencia conocida. Cengel y Ghajar aseguran, que al encontrarse aisladas las superficies exteriores del calentador, el calor generado por la resistencia es transferido totalmente a través del material (2011).

2.4.1.7. CONVECCIÓN

La convección es una forma de transferir la energía calórica entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que se encuentran en movimiento, es decir, en este análisis intervienen los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. La transferencia de calor es mayor por convección cuando el movimiento del fluido sea más rápido. Caso contrario, en ausencia de movimiento del fluido, la transferencia de calor se produce por conducción pura entre la superficie sólida y el fluido adyacente (Cengel & Ghajar, 2011).

2.4.2. SISTEMAS MAGNÉTICOS

El magnetismo forma parte de la física y no se puede explicar por postulados de la mecánica clásica. En la antigua Grecia se podía observar que algunos minerales (imanes) tenían la capacidad de atraer o repeler pequeños objetos de hierro (Martín & Serrano, 2015).

Las propiedades magnéticas en un imán se concentran en los extremos, que se denominan polos magnéticos, polo Norte [N] y polo Sur [S]. Al igual que las cargas eléctricas del mismo signo, se repelen y de distinta carga se atraen, en los imanes, los polos iguales se repelen y los polos opuestos se atraen. Es imposible aislar un polo magnético, de modo que si un imán se parte en dos, en cada uno de los trozos existe un polo Norte y un Polo Sur (Martín & Serrano, 2015).

El campo magnético es parecido a un campo eléctrico, el cual tiene un campo magnético B , representado por líneas de campo, de modo que en cada punto del espacio, el campo magnético es tangente a estas líneas (Figura 2.19). Por el motivo de que los polos magnéticos no se pueden separar, las líneas de campo son siempre cerradas, comenzando en el Polo Norte y llegando al Polo Sur (Martín & Serrano, 2015).

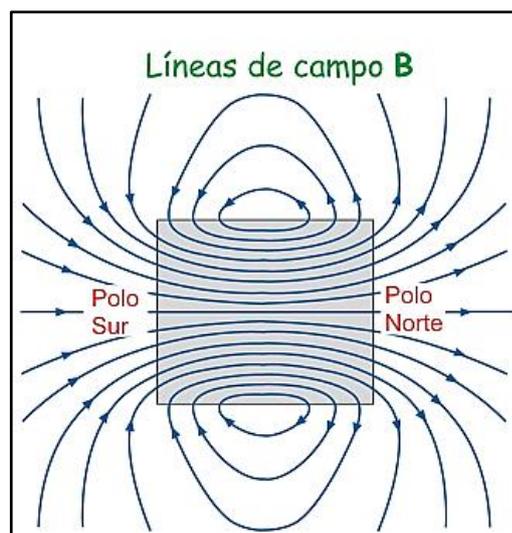


Figura 2.19. Campo Magnético

Fuente: (Martín & Serrano, 2015)

2.4.2.1. MATERIALES MAGNÉTICOS

Los materiales magnéticos se clasifican fundamentalmente en los siguientes grupos:

- **Ferromagnéticos:** denominados imanes por excelencia, son materiales que pueden ser magnetizados de forma permanente, por la aplicación de un campo magnético externo. Dentro de este grupo se puede citar: al hierro, al níquel, al cobalto y a diferentes aleaciones compuestas de éstos materiales (Martín & Serrano, 2015).
- **Paramagnéticos:** cada uno de los átomos que lo componen actúan como pequeños imanes, con la particularidad que están orientados al azar, por este motivo el efecto magnético se cancela. Cuando se aplica un campo magnético externo, estos materiales forman un campo paralelo al campo externo, que desaparece cuando se retira. Dentro de este grupo se encuentran: el aluminio, el magnesio, el titanio, el wolframio y el aire (Martín & Serrano, 2015).
- **Diamagnéticos:** en este tipo de materiales, la disposición de los electrones en los átomos ocasiona una anulación global de los efectos magnéticos. En la acción de un campo magnético externo, adquieren una imantación débil y de sentido opuesto al campo aplicado. Son diamagnéticos: el bismuto, la plata, el plomo y el agua (Martín & Serrano, 2015).

2.4.3. PROCESOS DE MANUFACTURA EN CHAPA METÁLICA

El conformado de chapa metálica, ha adquirido un desarrollo interesante en los últimos años, debido a la gran variedad y flexibilidad que ofrece este proceso en la fabricación de piezas, por ejemplo: carrocerías de automóviles, aviones, electrodomésticos, muebles, entre otros (López, 2011).

Existen diferentes condiciones previas que se debe considerar en la materia prima antes de ser procesada, para obtener resultados óptimos; entre estas consideraciones se pueden mencionar las siguientes (López, 2011):

- Superficies sin defectos
- Espesor uniforme
- Características uniformes del material

Los materiales más usados para los procesos de manufactura en chapa metálica son: el acero, el aluminio y el latón. A continuación se nombran algunas de las principales operaciones de procesamiento en chapa metálica (López, 2011):

- Punzonado y Troquelado
- Doblado y curvado
- Embutido

2.4.3.1. PROCESOS DE DOBLADO Y CURVADO

Los procesos de doblado y curvado son operaciones que no modifican el espesor del material. Se pueden producir mediante (López, 2011):

- Flexión: con fuerzas de compresión y tracción aplicadas desde el exterior
- Torsión

Algunos procedimientos de doblado son:

- Doblado sin estampa
- Doblado o curvado en redondo
- Doblado con estampa

Según López, los radios de unión que se recomiendan son (2011):

- 1 a 2 veces el espesor de la chapa para materiales dulces
- 3 a 4 veces el espesor de la chapa para materiales duros

Se puede destacar que los metales son elásticos, cuando al cesar la acción de doblado o curvado, tienden a recuperar su estado primitivo. Este efecto es más considerable cuando es un material duro. Para estos casos se tendrían que considerar ángulos de doblado más agudos a los deseados (López, 2011).

Los esfuerzos presentes en este proceso, en el caso más simple, pueden ser obtenidos mediante la ecuación Ec. 2.10 (López, 2011):

$$F = \frac{2 \sigma_d b s^2}{3 l} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

“F”, esfuerzo (kg)

“ σ_d ”, sollicitación a la flexión (kg/mm²)

“b”, longitud de doblado (mm)

“s”, espesor de la chapa (mm)

“l”, distancia entre apoyos de la plancha (mm)

2.4.3.2. PROCESOS DE PUNZONADO

El punzonado o perforación de chapa, se basa en un proceso que permite obtener figuras geométricas en una superficie plana, mediante el uso de herramientas adecuadas. Las cuchillas se asemejan a líneas cerradas, siguiendo el borde del punzón y la matriz (López, 2011).

El punzón durante su avance, debe enfrentarse a tres resistencias mecánicas (López, 2011):

- Resistencia opuesta por la estructura molecular del material
- Tensiones elásticas del material
- Resistencia a la expulsión de la pieza por rozamiento

Según López, la fuerza de corte es función del perímetro de la pieza, del espesor y de la resistencia al cizallado, como se muestra en la ecuación Ec. 2.11 (2011):

$$F = s \cdot e \cdot K_s \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

“s”, desarrollo de la periferia de la pieza a cortar (mm)

“e”, espesor (mm)

“ K_s ”, resistencia a la cizalladura (kg/mm^2)

La tensión o resistencia de cizalladura puede concadenarse con la de tracción mediante la ecuación Ec. 2.12 (López, 2011):

$$K_s = 0.5 \cdot \sigma_{ut} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Para chapas de acero suave se puede considerar $K_s = 200 \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)$.

2.5. SISTEMAS ELÉCTRICOS/ELECTRÓNICOS

2.5.1. MOTORES A PASOS

Los Motores a Pasos (Figura 2.20), son elementos que se caracterizan por ser ideales para mecanismos que requieren movimientos precisos y de un torque considerable, a velocidades bajas (Wildi, 2007).



Figura 2.20. Motor Nema 17

Fuente: (Schneider Electric Motion, 2015)

Su funcionamiento se basa en el movimiento de un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. El paso depende de cada motor, pero varía entre 90° y 1.8° por paso, es decir, que se requieren 4 pasos y 200 pasos respectivamente, para completar un giro. La máxima velocidad que se puede alcanzar es 4000 (RPM). Pueden girar en sentido horario o anti horario, dependiendo de la secuencia de pulsos que se aplique a sus respectivos devanados (Wildi, 2007).

Un motor a pasos, no puede repentinamente obtener la velocidad máxima, por ejemplo 1000 (RPM); de igual manera no puede detenerse instantáneamente. En este caso se debe adecuar una manera de acelerar el motor gradualmente. Este proceso se conoce como el “efecto de rampa”. En aceleración, el efecto de rampa consiste en un incremento progresivo de los pulsos por segundos (Wildi, 2007).

2.5.2. SISTEMAS DE CALENTAMIENTO

2.5.2.1. RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

Las resistencias son elementos eléctricos conductores, los cuales se oponen al paso de la corriente eléctrica. Son elementos que regulan la cantidad de corriente que circula en un circuito eléctrico, cuando existe un diferencial de voltaje. Tiene como objetivo fundamental, generar un descenso en el voltaje, que es proporcional a la corriente que circula, como se expresa en la ecuación Ec. 2.13 de la ley de Ohm (Wildi, 2007):

$$V = I * R$$

Ec. 2.13

Donde

“V”, voltaje o tensión (V)

“I”, corriente (A)

“R”, la resistencia (Ω)

2.5.2.2. SISTEMAS DE RESISTENCIAS PLANAS

Las resistencias planas (Figura 2.21), son elementos de potencia, que sirven para transformar de energía eléctrica en energía térmica; poseen una configuración geométrica asemejándose a una lámina plana, la cual adopta la forma de una superficie, cuando se coloque y se establezca el medio que se desea calentar (Floyd, 2007).



Figura 2.21. Resistencia Plana

Las resistencias planas se pueden fabricar de diferentes formas y tamaños, enfocados en su utilización, cabe destacar que cuando son fijadas, es recomendable no removerlas, debido a la posibilidad que el alambre interno se fracture.

2.5.3. ARDUINO

Arduino es una placa hardware libre que está constituida por un microcontrolador reprogramable y una serie de pines-hembra (unidos internamente al microcontrolador), que permiten conectar de forma muy sencilla y cómoda diferentes sensores y actuadores (Torrente, 2013).



Figura 2.22. Arduino Mega

Fuente: (Arduino, 2015)

Existen diferentes modelos oficiales de Arduino, con ciertas diferencias entre ellos: el tamaño físico, número de pines, la cantidad de memoria utilizable, entre otras. Estas características deben ser identificadas al momento de dimensionar el modelo de Arduino que requiere el proyecto (Torrente, 2013).

Arduino tiene su propio software o entorno de desarrollo. Esta interfaz tiene las características de ser gratis, libre y de multiplataforma, con lo cual, se puede escribir, verificar y guardar (cargar) en la memoria del microcontrolador de la placa Arduino. El lenguaje de programación que maneja esta plataforma se basa en el lenguaje C y C++. La placa Arduino utiliza un microcontrolador AVR, que se encarga de ejecutar el conjunto de instrucciones de una manera ordena (Torrente, 2013).

Entre las ventajas que tiene la placa Arduino, se destaca la versatilidad de su trabajo de manera autónoma, siempre y cuando, se encuentre alimentado de energía eléctrica, mediante una fuente externa. Además, de un sin número de diferentes protocolos de comunicación, que permiten transferir datos y embeber sistemas, como por ejemplo I²C, TWI y SPI (Torrente, 2013).

2.5.3.1. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN I²C

I²C (Inter-Integrated Circuit, o TWI “Two-wire”) es un sistema ampliamente utilizado en la industria especialmente para comunicar circuitos integrados entre sí. La característica principal de este protocolo de comunicación es utilizar dos líneas para transmitir la información, a estas líneas son denominadas como SDA y SCL. SDA se encarga de transferir los datos digitales y SCL es la encargada de enviar la señal de reloj (Torrente, 2013).

Todos los dispositivos conectados al bus I²C, poseen una dirección única que lo identifica respecto al resto de dispositivos, la configuración de cada dispositivo puede ser como “maestro” o “esclavo” (Figura 2.23). En un sistema cuya comunicación se base en el protocolo I²C, podrá existir tan solo un dispositivo que cumpla con la tarea de maestro, mientras que pueden existir varios esclavos que pertenezcan al sistema (Torrente, 2013).

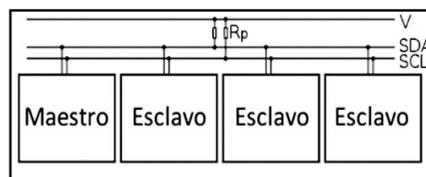


Figura 2.23. Protocolo de Comunicación I²C

Fuente: (Torrente, 2013)

En un sistema I²C, el dispositivo configurado como maestro, se encarga de iniciar la transmisión de datos, además de generar la señal de reloj. La señal de reloj permite el intercambio ordenado de datos entre los dispositivos que conforman la red (Torrente, 2013).

La velocidad de transferencia de datos que maneja este protocolo de comunicación es de 100 Kbits por segundo en el modo estándar. Debido a que existe una sola línea para la comunicación de datos, la transmisión de la información es *half dúplex* (un sentido al mismo tiempo), por lo que al momento que un dispositivo empieza a recibir un mensaje, los demás dispositivos deben esperar a que el emisor culmine la transmisión para poder utilizar el canal (Torrente, 2013).

CAPÍTULO 3. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA HOT-PLATE

3.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

Los parámetros de diseño considerados para el desarrollo del proyecto son: los parámetros de control, los parámetros de instrumentación, los parámetros de la estructura metálica y los parámetros de funcionamiento.

3.1.1. PARÁMETROS DE CONTROL

En los parámetros de control, se considera que la velocidad de rotación para mezclar el fluido, no es una variable de control rigurosa, ya que únicamente cumple con la función de homogeneizar la mezcla de la sustancia. Se permitirá una oscilación de ± 10 (RPM) en el control de velocidad tomando como referencia equipos similares en el mercado: (Science MED, 2014) y (LabTech, 2014).

La temperatura del sistema será controlada de una manera rigurosa, debido a que esta variable, es considerada muy importante en la preparación de la sustancia. Se diseñara el control con una oscilación de ± 3 ($^{\circ}\text{C}$) de temperatura.

En base a la investigación de algunas publicaciones enfocadas en el control difuso como: (Jantzaen, 1998), (Ross, 2004), (Reznik, 1997) y teniendo en cuenta que se requiere un control de velocidad y temperatura, se ha seleccionado a la lógica difusa para realizar este proyecto, debido a que tiene mejores prestaciones y flexibilidad que otras metodologías de control.

3.1.2. PARÁMETROS DE INSTRUMENTACIÓN

De acuerdo al requerimiento del proyecto, se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se ha decidido utilizar dos sensores de temperatura, uno para la temperatura existente en el plato metálico del equipo (resistencia plana) y el otro sensor utilizado para monitorear la temperatura de la sustancia.
- Para sensar las variables de temperatura en el plato y en la sustancia, hay disponibles diferentes tecnologías como lo son termistores, termocuplas, RTD's y circuitos integrados, cada uno de estos dispositivos tienen sus ventajas y desventajas dependiendo de su aplicación. En la Figura 3.1, se encuentra un cuadro comparativo con las características de las tecnologías mencionadas (Technical Documents, 2015).

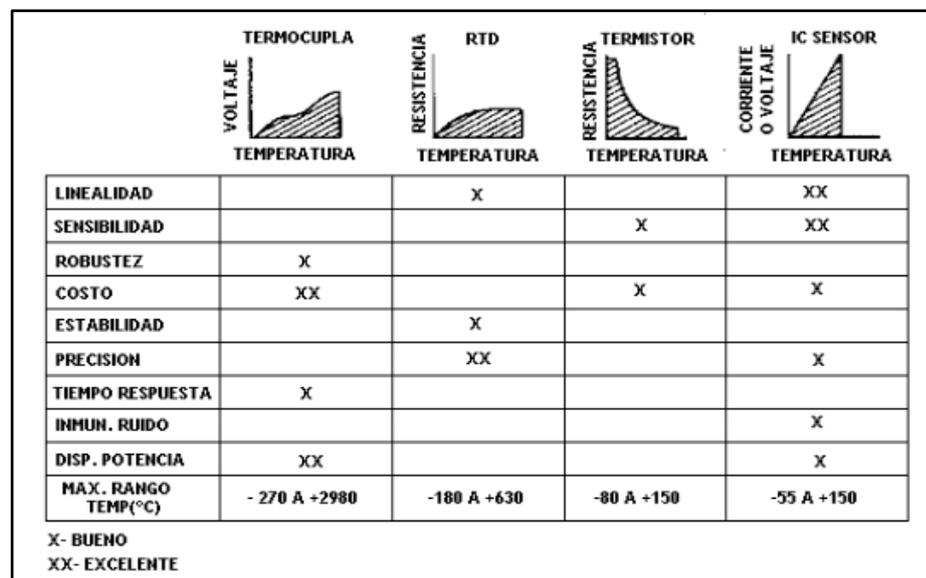


Figura 3.1. Comparativos de sensores de temperatura

Fuente: (Technical Documents, 2015)

- En el plato del equipo se utilizara como sensor de temperatura una termocupla, debido a que se maneja un rango entre 20 (°C) a 450 (°C), con

un tiempo de respuesta bajo. La termocupla seleccionada es 70XKSGD048A de la marca WATLOW (Figura 3.2).

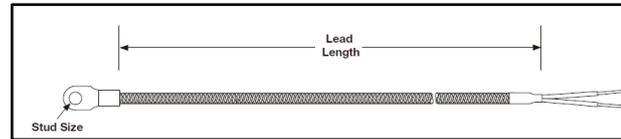


Figura 3.2. Termocupla tipo anillo marca WATLOW

Fuente: (WATLOW, 2014)

- Para el monitoreo de la temperatura de la sustancia se utilizara un sensor PT100, cuyo funcionamiento es como un RTD lineal. Además, debe ser resistente al agua, por esta razón su material de fabricación debe ser acero inoxidable, así no afectará a la composición química de las diferentes sustancias que se preparan. El rango de funcionamiento en la aplicación comprende temperaturas entre 20 (°C) y 100 (°C), con un tiempo de respuesta bajo. Por estas razones, el sensor PT100 seleccionado es RBGL0TA060BB090 de la marca WATLOW (Figura 3.3).

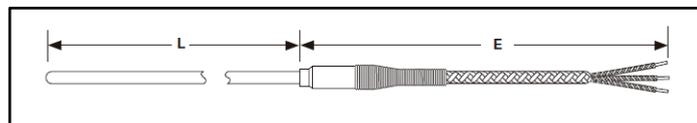


Figura 3.3. RTD metálico de la marca WATLOW

Fuente: (WATLOW, 2014)

3.1.3. PARÁMETROS DE LA ESTRUCTURA METÁLICA

La estructura metálica del equipo se compone de carcasa y plato, que tiene como características principales: no ser de un material magnético, debido a que interrumpe con el proceso de agitación magnética, y debe ser resistente al agua, en caso de que la sustancia se desparrame.

El acero inoxidable es un material que cumple con los requerimientos mencionados. Además, se puede encontrar en el mercado con facilidad, por esta razón la estructura y el plato de transmisión térmica se diseñarán con este material.

3.1.4. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

El Hot-Plate tendrá un control de temperatura y de velocidad de giro, el equipo consta de dos sensores de temperatura, el rango de control de temperatura es de 200 (°C) a 320 (°C) en el plato térmico y de 60 (°C) a 100 (°C) en la sustancia; en lo concerniente al control de velocidad, el equipo consta de un motor acoplado a un sistema de agitación magnética, el rango de operación es de 100 (RPM) a 370 (RPM), estas características aseguran el correcto funcionamiento del equipo en las diversas sustancias.

3.2. SELECCIÓN DE COMPONENTES

En este apartado se tratará todo lo relacionado a la selección de componentes necesarios para la construcción del proyecto.

3.2.1. SELECCIÓN DEL MOTOR

Para asignar el motor para el equipo se ha realizado una investigación respecto a equipos similares en artículos como los siguiente: (LabTech, 2014) y (Science MED, 2014) , a partir de esta investigación se establece que la potencia del motor será de 10 (W), seleccionando un motor a pasos Nema 17.

El Motor Nema 17 tiene como características principales, las mostradas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1

Características principales, motor Nema 17

Característica	Descripción
Fases	2
Steps/Revolución	200
Exactitud de paso	±5%
Corriente	1.5 A
Voltaje	12 VDC

CONTINÚA →

Potencia	10 W
Peso	230 gramos
Inercia del Rotor	0.057 kg-cm ²
Tiempo de vida	20 000 horas a 1 000 R.P.M.
Temperatura de operación	-20°C a +40°C
Clase de aislamiento	B, 130°C

Fuente: (Schneider Electric Motion, 2015)

Un motor a pasos puede ser controlado mediante un driver, que genera el tren de pulsos en función de la periodicidad de una salida analógica en un microcontrolador, en este proyecto se utilizara el driver A4988.

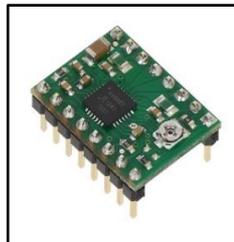


Figura 3.4. Driver A4988

Fuente: (Pololu, 2014)

El driver A4988 soporta *microstepping* para motores a pasos bipolares, que permiten un mayor rango de velocidades. Puede proporcionar hasta 2° de recorrido por activación de bobinado y su voltaje de operación permite el funcionamiento de motores a pasos con voltaje de polarización de 8 a 35 (V). Utiliza dos pines (dirección y pulso) para el funcionamiento del motor a pasos (Pololu, 2014).

Los motores a pasos dependen de la frecuencia de los pulsos en la entrada de sus bobinados, por esta razón es necesario utilizar un microcontrolador dedicado para el funcionamiento del motor del equipo.

En consecuencia, se ha realizado un sistema embebido, que es diseñado para realizar el control dedicado sobre la velocidad del motor. En este sistema

se ha empleado un Arduino Nano (Figura 3.5), que por sus características es óptimo para la función establecida.

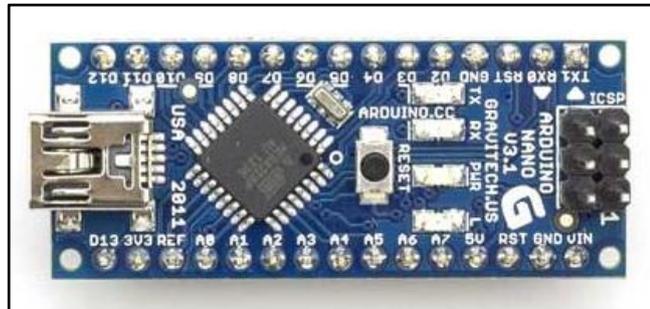


Figura 3.5. Arduino Nano

Fuente: (Arduino, 2015)

En el sistema embebido, el microcontrolador master será el Arduino Mega, encargado del control de la pantalla TFT, adquisición de datos de las respectivas variables en tiempo real, administrar las respectivas variables para el control del motor y además, ejecutar el control difuso en la resistencia plana para controlar la temperatura. El arduino nano, será el microcontrolador *slave*, dedicado al control difuso y funcionamiento del motor.

En este proyecto es importante definir el tipo de comunicación para él envío y la recepción de los datos. La comunicación entre los sensores, el motor a pasos y el Arduino Master será de forma convencional (mediante cables), mientras que para la comunicación entre el Arduino Mega y el Arduino Nano se utilizará el protocolo de comunicación I²C.

3.2.2. DIMENSIONAMIENTO DE LA RESISTENCIA PLANA

Mediante la investigación realizada y al observar catálogos de equipos similares, se ha considerado la potencia de 600 (W) para la resistencia plana, en función de varios aspectos, entre ellos la eficiencia energética, seguridad de operación y competitividad en el mercado.

El espesor del plato térmico del equipo será de $L=4$ (mm), el área de la base, será de 490 (cm^2) y el material seleccionado es acero inoxidable (Figura 3.6). Según la Tabla 2.2, el acero inoxidable tiene una conductividad térmica de $k= 16$ ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$). La superficie exterior pierde calor hacia los alrededores que están a $T = 20$ ($^\circ\text{C}$) (temperatura ambiente), por convección. Se ha tomado como coeficiente de transferencia de calor por convección: $h=20$ ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) según la Tabla 3.2, además se descarta la pérdida de calor por radiación.

Tabla 3.2

Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección

Tipo de convección	h, $\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$
Convección libre de gases	2 - 25
Convección libre de líquidos	10 - 1 000
Convección forzada de gases	25 - 250
Convección forzada de líquidos	50 - 20 000
Ebullición y condensación	2 500 – 100 000

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Para realizar el cálculo, se debe tomar en cuenta las siguientes suposiciones:

- La transferencia de calor es unidimensional, debido a que el área superficial de la placa es grande en relación con su espesor.
- La conductividad térmica es constante.
- La parte inferior del plato está aislada mediante placas de acero inoxidable y lana de vidrio, en consecuencia, todo el calor generado en la resistencia plana se trasfiere a la cara superior del plato (Figura 3.6).

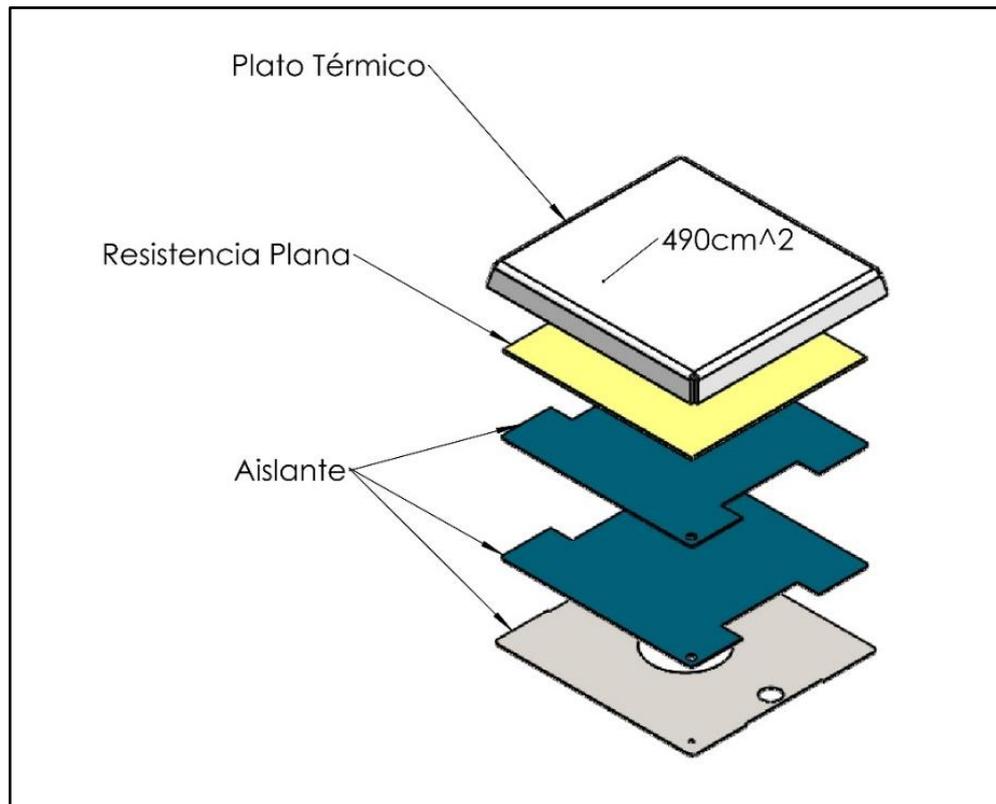


Figura 3.6. Esquema para el Dimensionamiento de la Resistencia Plana

La superficie superior del plato está sujeta a un flujo uniforme de calor a razón de la ecuación Ec. 3.1.

$$q_0 = \frac{\dot{Q}_0}{A_{base}} = \frac{600W}{0.049 m^2} = 12\,244.89 \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad \text{Ec. 3.1}$$

El lado exterior del plato está sujeta a la condición de convección. Se toma la dirección x como la perpendicular a la superficie del plato, la ecuación diferencial para este caso se expresa en la ecuación Ec. 3.2.

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad \text{Ec. 3.2}$$

Con las condiciones de frontera se obtiene las ecuaciones Ec. 3.3 y Ec. 3.4.

$$-k \frac{dT(0)}{dx} = q_0 = 12\,244.89 \text{ W/m}^2 \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$-k \frac{dT(L)}{dx} = h[T(L) - T_\infty] \quad \text{Ec. 3.4}$$

Mediante dos integraciones sucesivas se obtiene que la solución general de la ecuación diferencial Ec. 3.2, son las ecuaciones Ec. 3.5 y Ec. 3.6.

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$T(x) = C_1x + C_2 \quad \text{Ec. 3.6}$$

En donde C_1 y C_2 son constantes arbitrarias. Aplicando la primera condición de frontera se obtiene la ecuación Ec. 3.7.

$$-k \frac{dT(0)}{dx} = q_0 \rightarrow -kC_1 = q_0 \rightarrow C_1 = -\frac{q_0}{k} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Debido que $dT/dx = C_1$ y $T(L) = C_1L + C_2$, con la aplicación de la segunda condición de frontera se genera la ecuación Ec. 3.8.

$$-k \frac{dT(L)}{dx} = h[T(L) - T_\infty] \rightarrow -kC_1 = h[(C_1L + C_2) - T_\infty] \quad \text{Ec. 3.8}$$

Se procede a sustituir C_1 de la ecuación Ec. 3.7, se despeja C_2 de la ecuación Ec. 3.8 y se obtiene la ecuación Ec. 3.9.

$$C_2 = T_\infty + \frac{q_0}{h} + \frac{q_0}{k}L \quad \text{Ec. 3.9}$$

Finalmente, al sustituir C_1 y C_2 en la solución general de la ecuación Ec. 3.6, se obtiene la ecuación Ec. 3.10.

$$T(x) = T_{\infty} + \dot{q}_0 \left(\frac{L-x}{k} + \frac{1}{h} \right) \quad \text{Ec. 3.10}$$

La ecuación Ec. 3.10, es la solución para la variación de la temperatura en el plato. Las temperaturas en las superficies superior e inferior del plato se determinan al hacer las sustituciones $x=0$ y $x=L$, respectivamente.

$$\begin{aligned} T(0) &= T_{\infty} + \dot{q}_0 \left(\frac{L}{k} + \frac{1}{h} \right) && \text{Ec. 3.11} \\ &= 20^{\circ}\text{C} + \left(12\,244.89 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \left(\frac{0.004 \text{ m}}{16 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}}} + \frac{1}{20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}} \right) \\ &= 635.31^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Y

$$T(L) = T_{\infty} + \dot{q}_0 \left(0 + \frac{1}{h} \right) = 20^{\circ}\text{C} + \frac{12\,244.89 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}} = 632.25^{\circ}\text{C} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Se concluye que la temperatura máxima que se puede alcanzar es $635.31(^{\circ}\text{C})$ (Ec. 3.12), con una pérdida de $3.06 (^{\circ}\text{C})$ (Ec. 3.11) en el plato térmico. Es importante mencionar, que la temperatura máxima del equipo, en forma experimental, pueda ser menor a la calculada teóricamente, debido a que un porcentaje de calor se pierde por radiación.

3.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO

Los sistemas en el Hot-Plate (velocidad y temperatura), deben ser controlados para que el equipo funcione correctamente. Por esta razón, el equipo se divide en dos plantas de control: una planta de control de temperatura y una planta de control de velocidad (Figura 3.7).

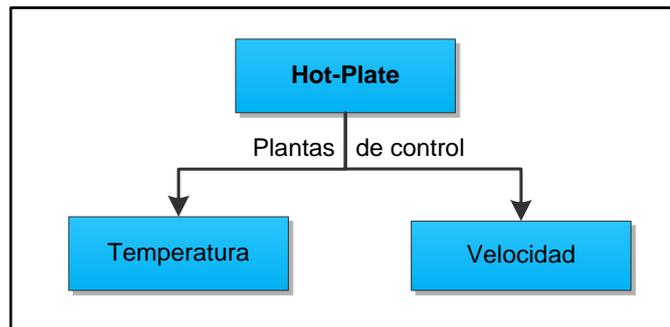


Figura 3.7. Plantas de control del Hot-Plate

Se ha seleccionado a la lógica difusa como metodología de control, pues ha demostrado ser más amigable, robusta y flexible, que las técnicas de control tradicional.

A partir de la explicación del literal 2.3.2, el control difuso no necesita del modelamiento de la planta o del sistema con una ecuación matemática para poder diseñar un controlador. Únicamente, se necesita conocer sobre el funcionamiento del sistema, de manera que, el diseñador pueda relacionar las entradas con las salidas del controlador y de esa manera generar acciones de control sobre el proceso.

Como se analizó en el capítulo dos, la realimentación de un sistema, depende de la rigurosidad del control que se desea implementar sobre el proceso. Existen algunos sistemas que no necesitan de realimentación para poder ser controlados correctamente.

En lazo abierto, el comportamiento del sistema depende exclusivamente de la correcta calibración del controlador. Se realiza un control en lazo abierto, cuando es aceptable que la salida de la planta, no sea un valor que deba mantenerse fijo e invariante. Esto quiere decir, que la salida oscile en un rango aceptable de funcionamiento sobre el proceso controlado.

En lazo cerrado, las acciones de control dependen del error que existe entre el *set point* y la salida del proceso. El valor existente en la salida del

proceso, es adquirido a través de un sensor, que permite su transducción a una señal electrónica entendible por el controlador.

La velocidad de rotación sobre el fluido, no necesita de un control riguroso, pues su funcionamiento permite la oscilación entre un rango de operación de ± 10 (RPM). El motor a pasos, que se utiliza para la transmisión de movimiento, puede ser controlado en lazo abierto, siempre y cuando se analice su comportamiento.

Por otra parte, el sistema de transmisión térmica, necesita un control más preciso y riguroso que el sistema rotatorio. Por esta razón, se diseñará un control en lazo cerrado en este sistema. A su vez, este sistema se dividirá en dos subsistemas de control (Figura 3.8): un sistema encargado del control de la temperatura del plato, que sirve de base para colocar cualquier tipo de recipiente que se utilice en el laboratorio y otro sistema encargado del control de la temperatura del fluido que se desee preparar en el laboratorio.

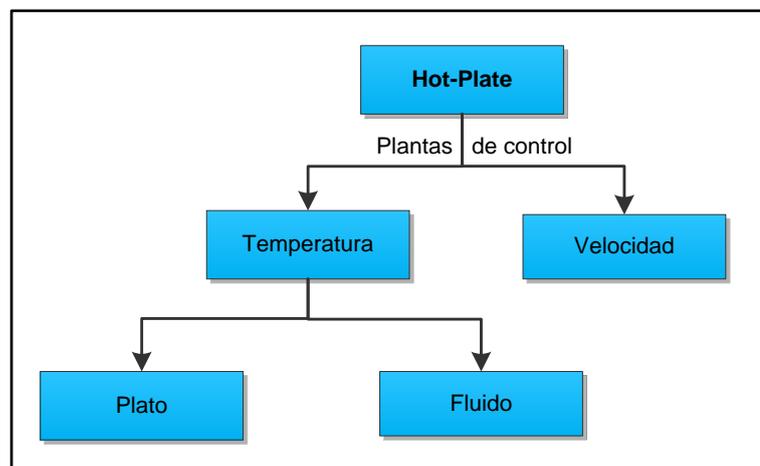


Figura 3.8. División de los sistemas de control de temperatura

3.3.1. CONTROLADOR DIFUSO DE TEMPERATURA

El Hot-Plate, permitirá el control de la temperatura en tiempo real sobre el plato térmico o sobre la sustancia que interviene en el proceso. Por esta razón, se debe diseñar dos controladores diferentes, debido a que las plantas de control son distintas, aunque el actuador (resistencias planas) sea el mismo.

3.3.1.1. SISTEMA DE CONTROL DE LA TEMPERATURA EN EL PLATO

Se necesita definir los elementos que forman parte del sistema para poder realizar el diseño de un controlador difuso:

- Planta: se compone por la resistencia plana, que es el elemento generador de energía térmica y del plato metálico, que transfiere esta energía hacia el fluido.
- Controlador: será desarrollado a partir de lógica difusa.
- Variable controlada: la temperatura existente en el plato metálico es la variable a ser controlada.
- Variable manipulada: la resistencia plana, funciona con energía eléctrica, por esta razón, se manipulará la cantidad de corriente alterna que pase por la resistencia plana, mediante un circuito de control (PWM).

Los elementos que conforman el sistema de control de la temperatura en el plato, se resumen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3

Elementos del sistema de control de la temperatura en el plato

Nombre	Elemento
Planta	Sistema de resistencia plana y plato metálico
Controlador	Controlador por lógica difusa en lazo cerrado
Variable controlada	Temperatura en el plato
Variable manipulada	Corriente eléctrica
Sensor	Termocupla tipo K

En la Figura 3.9, se puede observar el diagrama de control con los elementos que intervienen en el sistema.

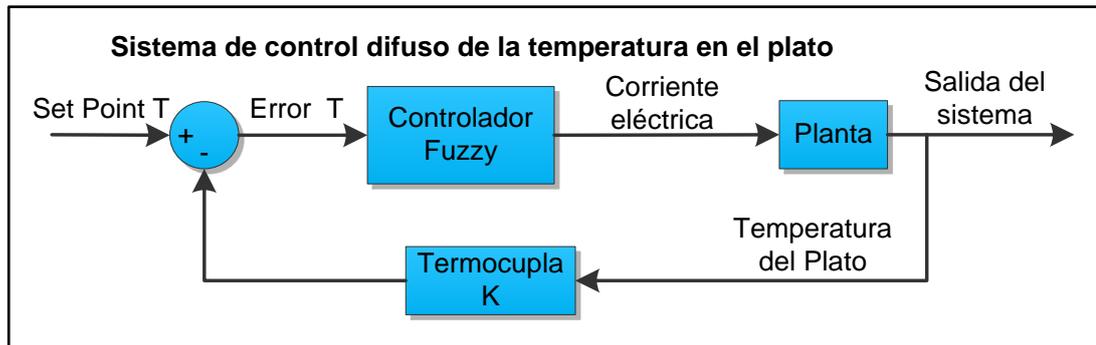


Figura 3.9. Diagrama del sistema de control de temperatura en el plato

El error será la entrada al controlador difuso, por esta razón, se diseñará los conjuntos difusos de entrada y las variables lingüísticas a partir de esta variable.

Se utilizará una herramienta matemática que trabaja con elementos matriciales para diseñar el controlador difuso. Esta herramienta permite observar el grado de membresía y la relación existente entre las entradas y las salidas de un sistema difuso, relacionadas mediante las reglas de fusificación.

- ***Funciones de membresía de entrada***

El control se ejecutará cuando el error este en un rango (universo tratado) comprendido entre $[0 \ 2.5]$ ($^{\circ}\text{C}$), cuando el error sea negativo, el sistema de potencia se apagará por completo, mientras que cuando el error sea superior a 2.5, el sistema funcionará a una potencia predeterminada, que será la máxima que podrá alcanzar en el desarrollo de su funcionamiento.

La variable del error se someterá a siete funciones de membresía de entrada comprendidas en el rango de $[0 \ 2.5]$, como se observa en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4

Funciones de membresía de entrada del controlador de temperatura en el plato

Función de membresía	Etiqueta	Forma de la función	Rango
Error muy pequeño	E_{MP}	Trapezoidal	[-0.5 -0.5 0 0.55]
Error pequeño	E_P	Triangular	[0.2 0.55 0.9]
Error medio bajo	E_{MB}	Triangular	[0.55 0.9 1.25]
Error medio	E_M	Triangular	[0.9 1.25 1.6]
Error medio alto	E_{MA}	Triangular	[1.25 1.6 1.95]
Error grande	E_G	Triangular	[1.6 1.95 2.3]
Error muy grande	E_{MG}	Trapezoidal	[1.95 2.5 3.5 3.5]

Las funciones de membresía del conjunto de entrada se muestran en la Figura 3.10.

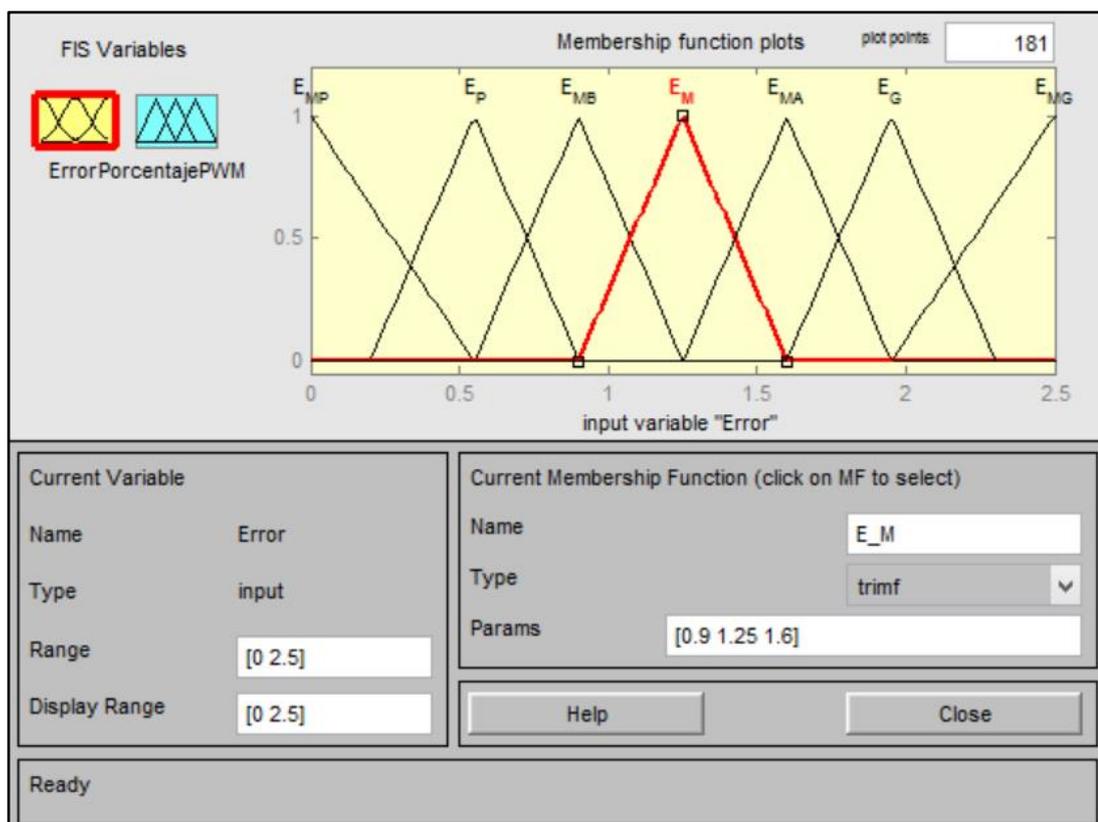


Figura 3.10. Funciones de membresía de entrada del controlador de temperatura en el plato

- ***Funciones de membresía de salida***

La salida del sistema debe manejar la potencia máxima del sistema, de forma que cuando el error se aproxime a cero, el sistema de potencia tienda a apagarse, y que cuando el error supere el límite superior de 2.5 (°C), el sistema funcione a máxima potencia. De esta manera el sistema oscilará alrededor del *set point*.

Por esta razón, la salida se diseñará para que el controlador manipule el porcentaje de potencia en la resistencia plana. La salida estará comprendido en un rango comprendido entre [0 100].

Para regular la potencia de salida en la resistencia plana, se utilizará un circuito que permita utilizar una salida PWM del microcontrolador y que regule el paso de corriente AC.

Las siglas PWM provienen de “*Pulse Width Modulation*” (Modulación de Ancho de Pulso). Este tipo de señal permite emitir pulsos cuadrados de frecuencia constante (Figura 3.11), en vez de una señal digital continua. Esto permite variar el valor promedio del voltaje de salida del microcontrolador: mientras más cortos sean los pulsos, menor será el valor de voltaje de salida y mientras más duración tenga los pulsos en alto, mayor será el voltaje resultante (Torrente, 2013).

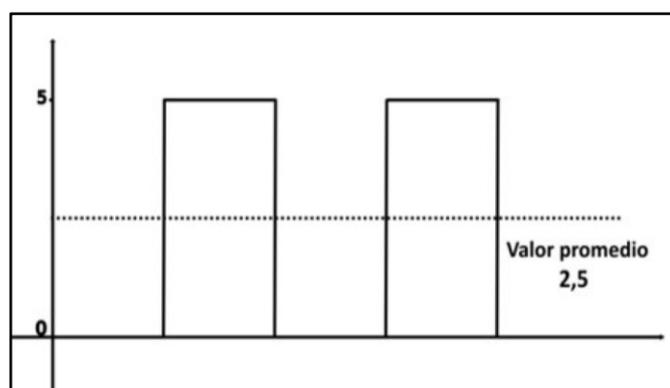


Figura 3.11. Modulación de ancho de pulso (PWM)

Fuente: (Torrente, 2013)

La variable de salida PWM, se someterá a siete funciones de membresía de salida comprendidas en el rango de [0 100], que corresponde a su respectivo porcentaje de salida, como se puede observar en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5

Funciones de membresía de salida del controlador de temperatura en el plato

Función de membresía	Etiqueta	Forma de la función	Rango
PWM muy pequeño	PWM _{MP}	Trapezoidal	[-10 -10 0 20]
PWM pequeño	PWM _{EP}	Triangular	[5 20 35]
PWM medio bajo	PWM _{MB}	Triangular	[20 35 50]
PWM medio	PWM _M	Triangular	[35 50 65]
PWM medio alto	PWM _{MA}	Triangular	[50 65 80]
PWM grande	PWM _G	Triangular	[65 80 95]
PWM muy grande	PWM _{MG}	Trapezoidal	[80 100 120 120]

Las funciones de membresía del conjunto de salida se muestran en la Figura 3.12.

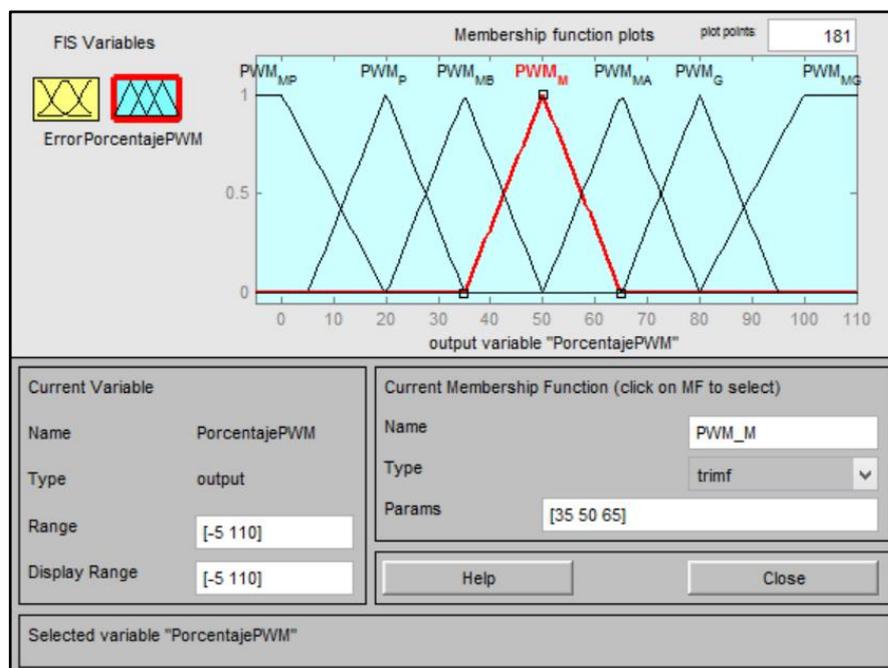


Figura 3.12. Funciones de membresía de salida del controlador de temperatura en el plato

- **Reglas de control difusas**

Las funciones de membresía de entrada y de salida, se relacionan de modo que: mientras el error sea alto, el porcentaje de PWM será mayor. En caso contrario, si el error es bajo, el porcentaje de PWM será menor. Las reglas de control difuso para el sistema de control de temperatura en el plato se resumen en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6

Reglas de fusificación del controlador de temperatura en el plato

N° de Regla	Regla	Etiqueta
1	SI Error es muy pequeño, ENTONCES el PWM es muy pequeño	SI E_{MP} ENTONCES PWM_{MP}
2	SI Error es pequeño, ENTONCES el PWM es pequeño	SI E_P ENTONCES PWM_P
3	SI Error es medio bajo, ENTONCES el PWM es medio bajo	SI E_{MB} ENTONCES PWM_{MB}
4	SI Error es medio, ENTONCES el PWM es medio	SI E_M ENTONCES PWM_M
5	SI Error es medio alto, ENTONCES el PWM es medio alto	SI E_{MA} ENTONCES PWM_{MA}
6	SI Error es grande, ENTONCES el PWM es grande	SI E_G ENTONCES PWM_G
7	SI Error es muy grande, ENTONCES el PWM es muy grande	SI E_{MG} ENTONCES PWM_{MG}

En la Figura 3.13, se observa las reglas que relacionan las funciones de membresía de entrada con las funciones de membresía de salida en el software de simulación.

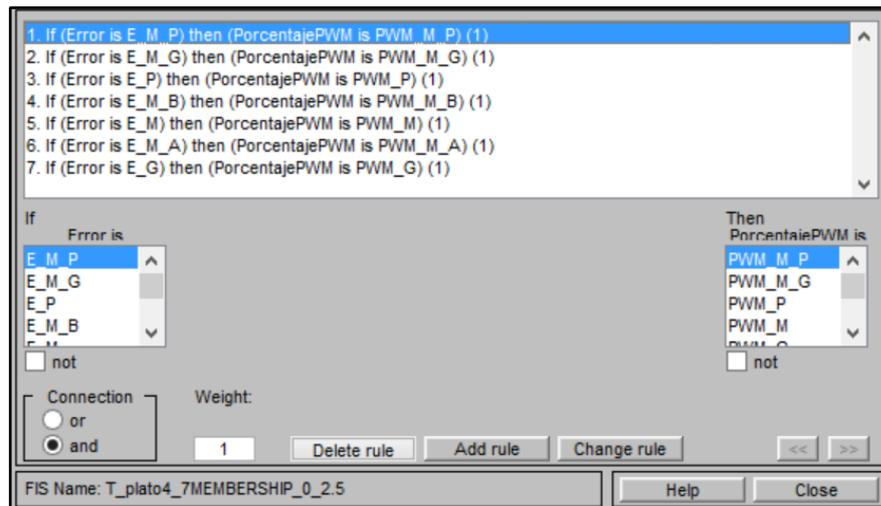


Figura 3.13. Reglas de fusificación del controlador de temperatura en el plato

- **Defusificación**

El método del centroide se utilizará para el cálculo de defusificación del sistema de control difuso. Este método permite convertir el valor de pertenencia de las funciones de membresía de salida, de valores lingüísticos en valores reales, utilizados en el control. La superficie de control se muestra en la Figura 3.14, en donde se observa la relación que existe entre la entrada y la salida del sistema de control difuso.

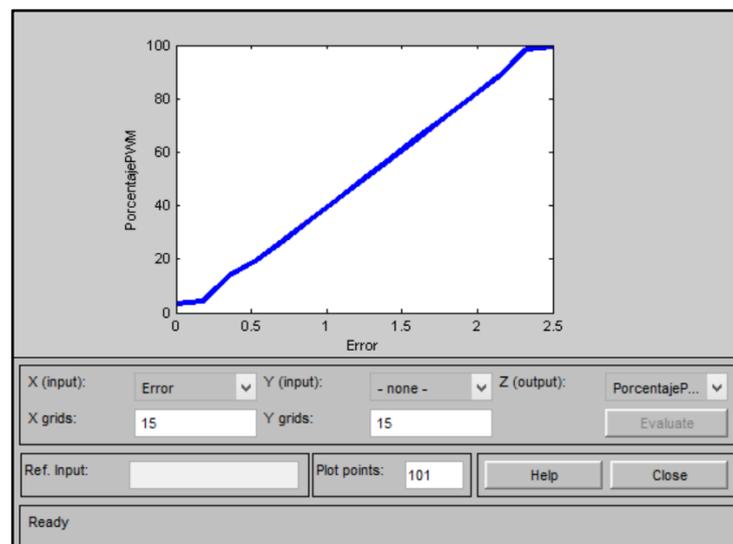


Figura 3.14. Superficie de control del sistema de temperatura en el plato

En la Tabla 3.7, se encuentran tabulados algunos valores que adopta la salida en función del valor del error en la entrada del sistema.

Tabla 3.7

Valores de la salida del controlador de temperatura en el plato

Error	Porcentaje de PWM en la salida
2.5	99.5 %
2.25	94.5 %
2	82.1 %
1.75	71.6 %
1.5	60.2 %
1.25	50 %
1	39.8 %
0.75	28.4 %
0.5	18.7 %
0.25	8.3 %
0	3.3 %

3.3.1.2. SISTEMA DE CONTROL DE LA TEMPERATURA EN EL FLUIDO

De igual manera, se mencionan a continuación, los elementos que intervienen en este sistema:

- Planta: compuesta por la resistencia plana, del plato metálico y del fluido. Como se explicó con anterioridad, los dos sistemas (temperatura en el plato y temperatura en el fluido) utilizan el mismo actuador.
- Controlador: el controlador será desarrollado a partir de lógica difusa.
- Variable controlada: la temperatura existente en el fluido.
- Variable manipulada: al igual que el sistema de temperatura en el plato, la variable manipulada será la cantidad de corriente que pase por la resistencia plana.

Los elementos que forman parte del sistema de control de la temperatura en el fluido, se resumen en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8

Elementos del sistema de control de la temperatura en el fluido

Nombre	Elemento
Planta	Sistema de resistencia plana, plato metálico y fluido
Controlador	Controlador por lógica difusa en lazo cerrado
Variable controlada	Temperatura en el fluido
Variable manipulada	Corriente eléctrica
Sensor	RTD tipo PT100

En la Figura 3.15, se puede observar el diagrama de control con los elementos que intervienen en el sistema.

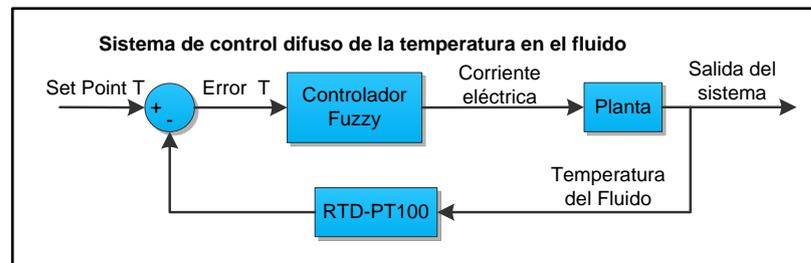


Figura 3.15. Diagrama del sistema de control de temperatura en el fluido

De igual manera que el sistema de control de temperatura del plato, en este sistema, el error será la entrada en controlador difuso, por esta razón, se diseñará los conjuntos difusos de entrada y las variables lingüísticas a partir de esta variable.

- ***Funciones de membresía de entrada***

El control se ejecutará cuando el error este en un rango comprendido entre $[0 \ 5]$, cuando el error sea negativo, el sistema de potencia se apagará por completo, mientras que cuando el error sea superior a 5, el sistema funcionará a potencia máxima predeterminada.

La variable del error se someterá a siete funciones de membresía de entrada comprendidas en el rango de $[0 \ 5]$, como se observa en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9

Funciones de membresía de entrada del controlador de temperatura en el fluido

Función de membresía	Etiqueta	Forma de la función	Rango
Error muy pequeño	E_{MP}	Trapezoidal	[-1 -1 0 1.1]
Error pequeño	E_P	Triangular	[0.4 1.1 1.8]
Error medio bajo	E_{MB}	Triangular	[1.1 1.8 2.5]
Error medio	E_M	Triangular	[1.8 2.5 3.2]
Error medio alto	E_{MA}	Triangular	[2.5 3.2 3.9]
Error grande	E_G	Triangular	[3.2 3.9 4.6]
Error muy grande	E_{MG}	Trapezoidal	[3.9 5 6 6]

Las funciones de membresía del conjunto de entrada del controlador se muestran en la Figura 3.16.

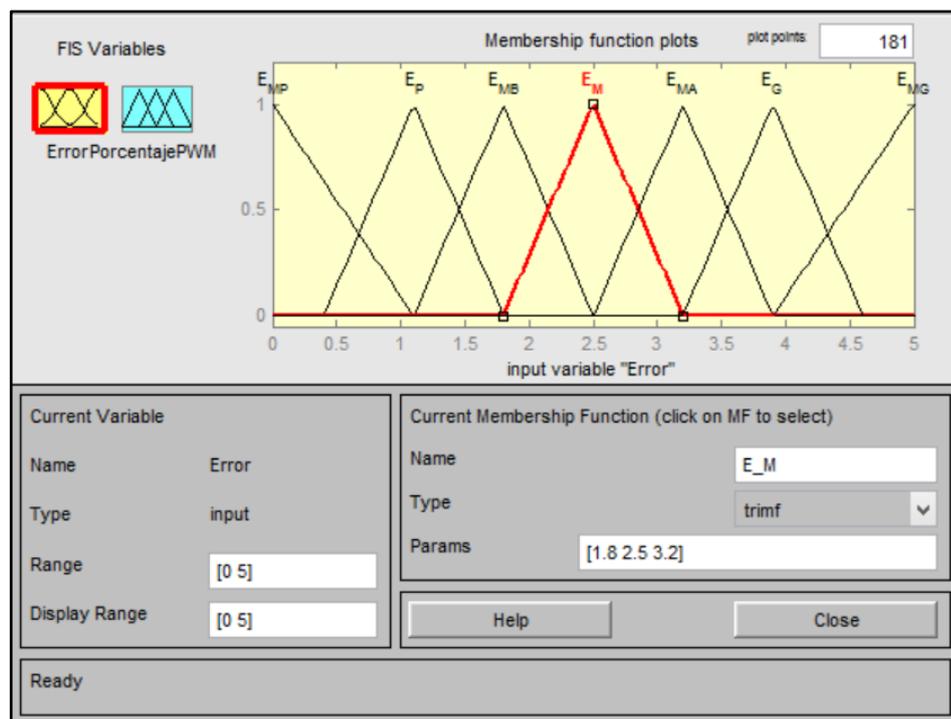


Figura 3.16. Funciones de membresía de entrada del controlador de temperatura en el fluido

- **Funciones de membresía de salida**

Al igual que el controlador de la temperatura en el plato, las funciones de membresía de salida se diseñaran para que el controlador manipule el

porcentaje de potencia en la resistencia plana. La salida estará comprendido en un rango comprendido entre [0 100].

La variable de salida PWM, se someterá a siete funciones de membresía de salida comprendidas en el rango de [0 100], que corresponde a su respectivo porcentaje de salida, como se puede observar en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10

Funciones de membresía de salida del controlador de temperatura en el fluido

Función de membresía	Etiqueta	Forma de la función	Rango
PWM muy pequeño	PWM _{MP}	Trapezoidal	[-10 -10 0 20]
PWM pequeño	PWM _{EP}	Triangular	[5 20 35]
PWM medio bajo	PWM _{MB}	Triangular	[20 35 50]
PWM medio	PWM _M	Triangular	[35 50 65]
PWM medio alto	PWM _{MA}	Triangular	[50 65 80]
PWM grande	PWM _G	Triangular	[65 80 95]
PWM muy grande	PWM _{MG}	Trapezoidal	[80 100 120 120]

Las funciones de membresía del conjunto de salida se muestran en la Figura 3.17.

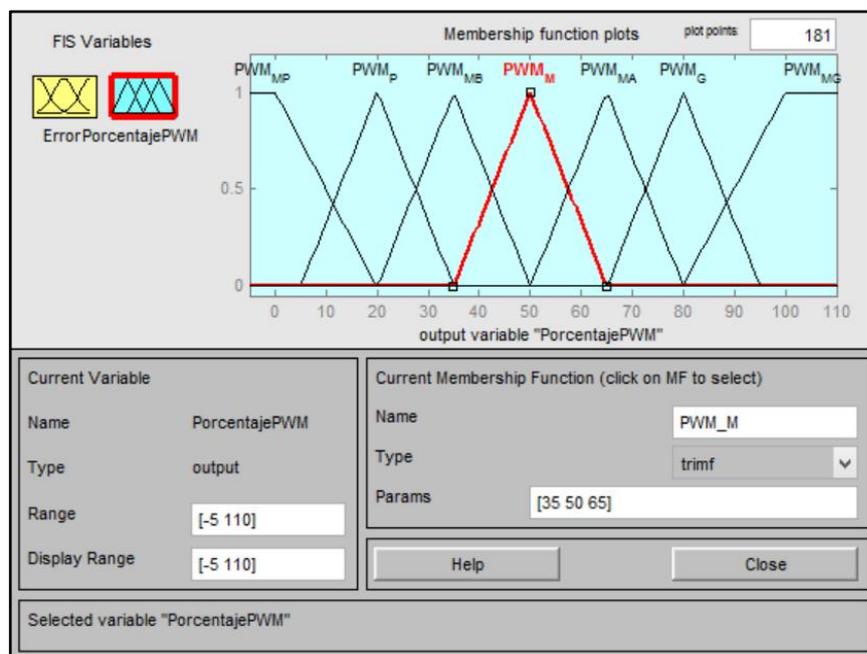


Figura 3.17. Funciones de membresía de salida del controlador de temperatura en el fluido

- **Reglas de control difusas**

Las funciones de membresía de entrada y de salida, se relacionan de modo que: mientras el error sea alto, el porcentaje de PWM será mayor. En caso contrario, si el error es bajo, el porcentaje de PWM será menor. Las reglas de control difuso para el sistema de control de temperatura en el fluido se resumen en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11

Reglas de fusificación del controlador de temperatura en el fluido

N° de Regla	Regla	Etiqueta
1	SI Error es muy pequeño, ENTONCES el PWM es muy pequeño	SI E_{MP} ENTONCES PWM_{MP}
2	SI Error es pequeño, ENTONCES el PWM es pequeño	SI E_P ENTONCES PWM_P
3	SI Error es medio bajo, ENTONCES el PWM es medio bajo	SI E_{MB} ENTONCES PWM_{MB}
4	SI Error es medio, ENTONCES el PWM es medio	SI E_M ENTONCES PWM_M
5	SI Error es medio alto, ENTONCES el PWM es medio alto	SI E_{MA} ENTONCES PWM_{MA}
6	SI Error es grande, ENTONCES el PWM es grande	SI E_G ENTONCES PWM_G
7	SI Error es muy grande, ENTONCES el PWM es muy grande	SI E_{MG} ENTONCES PWM_{MG}

En la Figura 3.18, se observa las reglas que relacionan las funciones de membresía de entrada con las funciones de membresía de salida en el software de simulación.

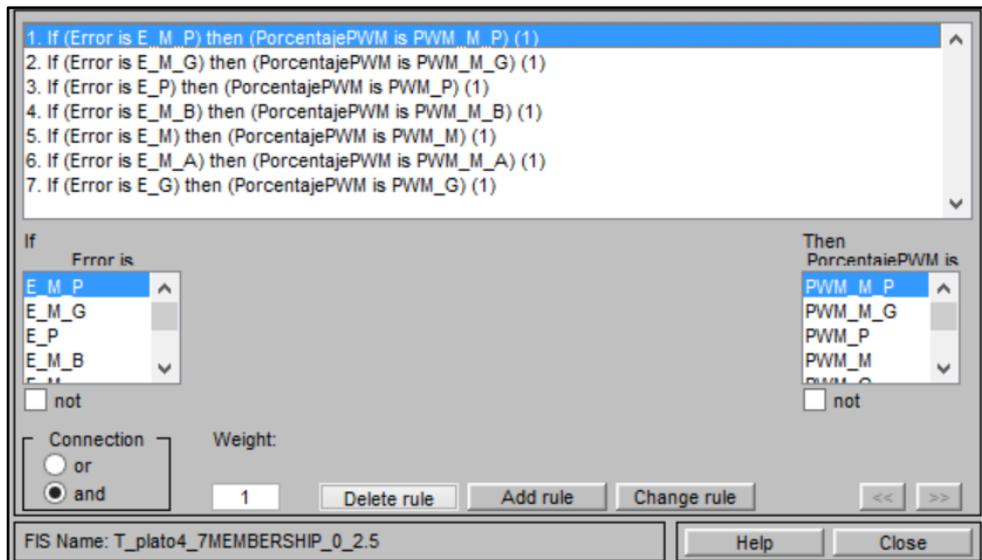


Figura 3.18. Reglas de fusificación del controlador de temperatura en el fluido

- **Defusificación**

Se utilizará el método del centroide para el cálculo de defusificación del sistema de control difuso. La superficie de control se muestra en la Figura 3.19, en donde se observa la relación que existe entre la entrada y la salida del sistema de control difuso.

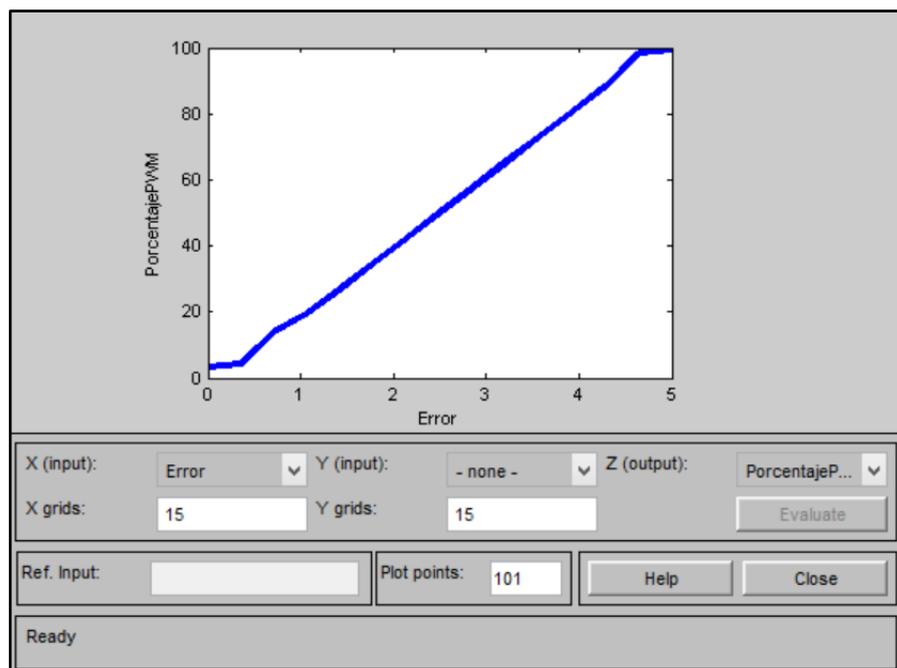


Figura 3.19. Superficie de control del sistema de temperatura en el fluido

En la Tabla 3.12, se encuentran tabulados algunos valores que adopta la salida en función del valor del error en la entrada del sistema.

Tabla 3.12

Valores de la salida del controlador de temperatura en el fluido

Error	Porcentaje de PWM en la salida
5	99.5 %
4.5	94.5 %
4	82.1 %
3.5	71.6 %
3	60.2 %
2.5	50 %
2	39.8 %
1.5	28.4 %
1	18.7 %
0.5	8.3 %
0	3.3 %

3.3.2. CONTROLADOR DIFUSO DE VELOCIDAD

Los elementos que intervienen en este sistema se mencionan a continuación:

- Planta: se conforma por el motor a pasos que genera la rotación del sistema magnético. La relación de transmisión de velocidad es uno a uno, debido a que la rotación entre el magneto y el eje es de forma solidaria.
- Controlador: el controlador será desarrollado a partir de lógica difusa en lazo abierto.
- Variable controlada: en este proceso, la velocidad de rotación del magneto se convierte en la variable controlada.
- Variable manipulada: la variable que se manipula en este sistema, es el periodo en el tren de pulsos que genera el microcontrolador y permite la rotación del motor a pasos.

En la Tabla 3.13, se resumen los elementos que forman parte del control de velocidad en el Hot-Plate.

Tabla 3.13

Elementos del sistema de control de velocidad

Nombre	Elemento
Planta	Motor a pasos
Controlador	Controlador por lógica difusa en lazo abierto
Variable controlada	Velocidad de rotación
Variable manipulada	Periodo en el tren de pulsos

El control de velocidad se basa en el diseño del sistema en lazo abierto, por esta razón es necesario conocer del comportamiento del motor a utilizarse en el equipo. Como se explicó en el literal 3.2.1, se ha seleccionado un motor a pasos de norma Nema 17.

El comportamiento de la velocidad de rotación en función del periodo, se detalla en la Tabla 3.14. Estos datos se obtuvieron al probar el comportamiento de la planta con diferentes periodos de tiempo.

Tabla 3.14

Relación entre la velocidad de rotación y el periodo en el tren de pulsos

t (μs)	Velocidad (RPM)
140,00	118,00
120,00	133,33
100,00	148,00
90,00	162,00
85,00	169,00
78,00	180,00
73,00	190,00
67,80	200,00
62,50	210,00
58,20	220,00
53,90	230,00
48,00	250,00
42,50	270,00
38,00	290,00
35,80	300,00

CONTINÚA \longrightarrow

31,00	320,00
27,00	340,00
24,70	360,00
22,00	380,00
19,50	400,00
17,00	420,00
15,00	435,00
13,00	458,00
12,00	468,00
11,00	480,00
10,00	493,00
9,00	507,00
8,00	515,00

Los datos de la Tabla 3.14 se utilizaron para obtener una curva que represente la velocidad del motor en función del periodo de tiempo que se utiliza en la programación. La Figura 3.20, muestra la curva obtenida del ajuste de estos datos.

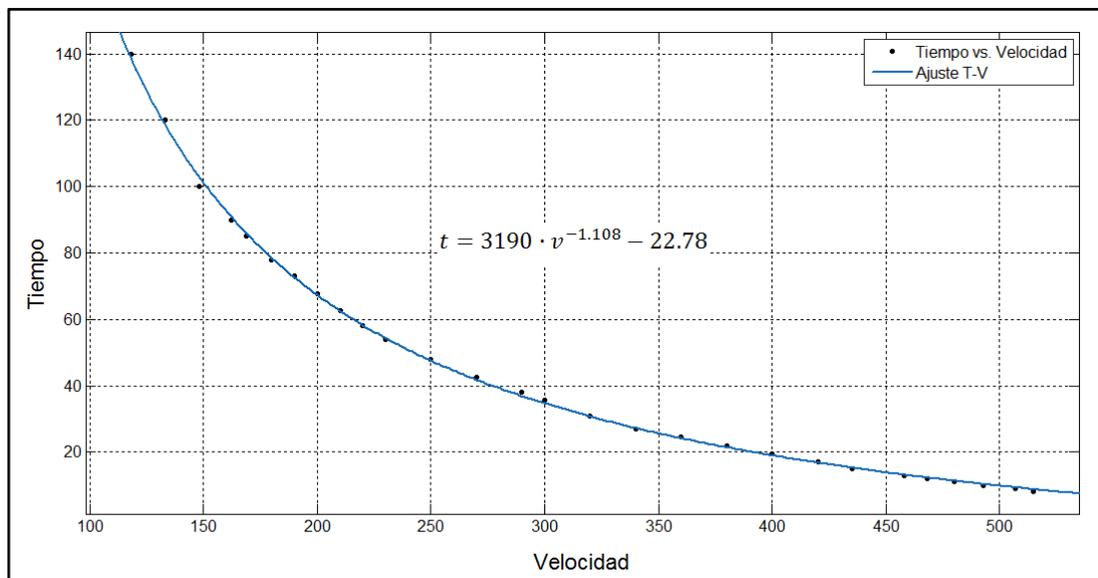


Figura 3.20. Velocidad de rotación en función del periodo de tiempo

La ecuación Ec. 3.13, representa al ajuste de la curva que muestra el comportamiento del motor. Esta ecuación permitirá obtener valores para el diseño del controlador.

$$t = 3190 \cdot v^{-1.108} - 22.78$$

Ec. 3.13

Los rangos de funcionamiento del motor, estarán comprendidos entre las 100 y 370 (RPM), como se explicó en el literal 3.1.4, por esta razón, se ha seleccionado intervalos de 20 (RPM), para obtener valores de control. Estos valores, serán utilizados para implementar las funciones de membresía de entrada y de salida del controlador. En la Tabla 3.15, se detallan los valores obtenidos mediante la Ec. 3.13.

Tabla 3.15

Valores de rotación y periodos de tiempo entre 80 y 420 [RPM]

Velocidad (RPM)	t (μs)
80	226,1
100	171,6
120	136,0
140	111,1
160	92,7
180	78,6
200	67,4
220	58,4
240	50,9
260	44,6
280	39,3
300	34,8
320	30,8
340	27,3
360	24,2
380	21,5
400	19,1
420	16,9

En la Figura 3.21, se puede observar el diagrama de control con los elementos que intervienen en el sistema de control de velocidad.

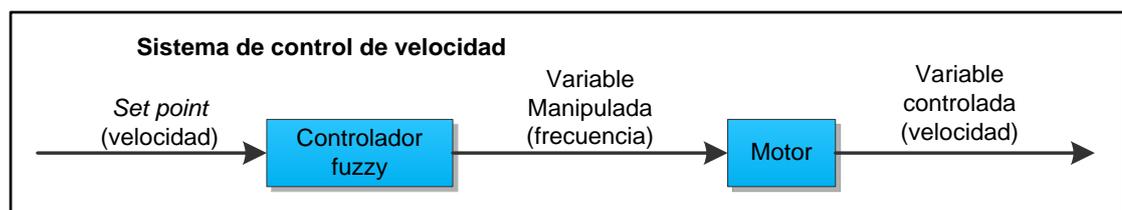


Figura 3.21. Diagrama del sistema de control de velocidad

La entrada en el sistema de control difuso para controlar la velocidad, no será el error, debido a que su funcionamiento no es una variable rigurosa que requiera de control preciso. Por esta razón el controlador de velocidad será diferente a los controladores de temperatura que se desarrollaron con anterioridad.

- ***Funciones de membresía de entrada***

El control se ejecutará en un rango de velocidad de [100 370] (RPM), se utilizará los valores de la Tabla 3.15, para generar las funciones de membresía de la entrada del controlador.

La entrada del sistema, se someterá a trece funciones de membresía, que se resumen en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16

Funciones de membresía de entrada del controlador de velocidad

Función de membresía	Etiqueta	Forma de la función	Rango
Velocidad 120	V120	Trapezoidal	[100 100 120 135]
Velocidad 140	V140	Triangular	[125 140 155]
Velocidad 160	V160	Triangular	[145 160 175]
Velocidad 180	V180	Triangular	[165 180 195]
Velocidad 200	V200	Triangular	[185 200 215]
Velocidad 220	V220	Triangular	[205 220 235]
Velocidad 240	V240	Triangular	[225 240 255]
Velocidad 260	V260	Triangular	[245 260 275]
Velocidad 280	V280	Triangular	[265 280 295]
Velocidad 300	V300	Triangular	[285 300 315]
Velocidad 320	V320	Triangular	[305 320 335]
Velocidad 340	V340	Triangular	[325 340 355]
Velocidad 360	V360	Trapezoidal	[345 360 380 380]

Las funciones de membresía del conjunto de entrada del controlador de velocidad se muestran en la Figura 3.22.

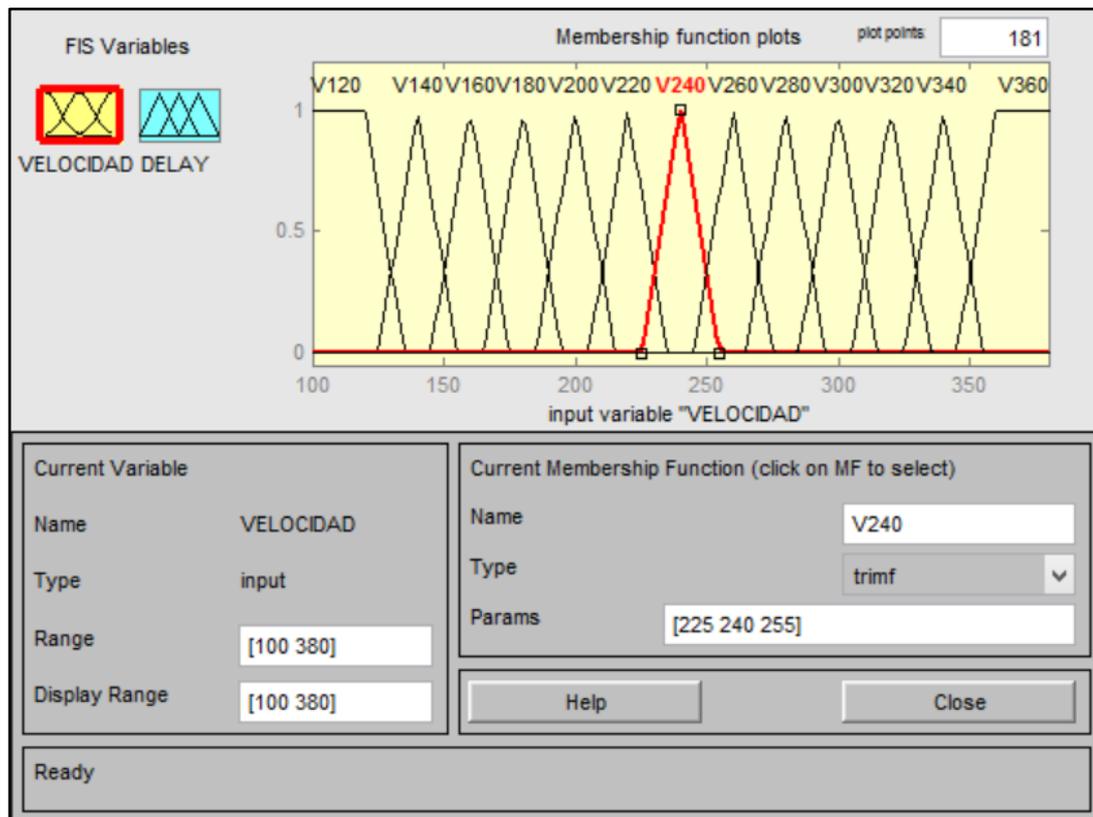


Figura 3.22. Funciones de membresía de entrada del controlador de velocidad

- **Funciones de membresía de salida**

La relación entre la entrada y la salida del controlador no es lineal, por esta razón, las funciones de membresía de salida se han probado varias veces para que el ajuste del control funcione correctamente.

La variable de salida regula la frecuencia con un retardo de tiempo que permite el cambio de la señal entre 0 y 1 lógico por parte del microcontrolador. Las trece funciones de membresía de salida, están comprendidas entre [20 170] (us), que corresponde al retardo de tiempo para variar la frecuencia de la salida del tren de pulsos. En la Tabla 3.17, se observa las funciones de membresía de salida del controlador de velocidad.

Tabla 3.17

Funciones de membresía de salida del controlador de velocidad

Función de membresía	Etiqueta	Forma de la función	Rango																		
Retardo de tiempo 120	T120	Trapezoidal	[120.1 131 170 170]																		
Retardo de tiempo 140	T140	Trapezoidal	[96.7 104.1 118.1 133]																		
Retardo de tiempo 160	T160	Trapezoidal	[82.6 89.7 95.7 110.7]																		
Retardo de tiempo 180	T180	Trapezoidal	[70.6 75.6 81.6 91.6]																		
Retardo de tiempo 200	T200	Trapezoidal	[62.4 65.4 69.4 78.4]																		
Retardo de tiempo 220	T220	Trapezoidal	[52.4 55.4 61.4 65.4]																		
Retardo de tiempo 240	T240	Trapezoidal	[46.9 49.9 51.9 56.9]																		
Retardo de tiempo 260	T260 </tr <tr> <td>Retardo de tiempo 280</td> <td>T280</td> <td>Trapezoidal</td> <td>[36.3 38.3 40.3 42.8]</td> </tr> <tr> <td>Retardo de tiempo 300</td> <td>T300</td> <td>Trapezoidal</td> <td>[31.8 33.8 35.8 37.8]</td> </tr> <tr> <td>Retardo de tiempo 320</td> <td>T320</td> <td>Trapezoidal</td> <td>[28.5 30 31.5 33]</td> </tr> <tr> <td>Retardo de tiempo 340</td> <td>T340</td> <td>Trapezoidal</td> <td>[25.3 26.8 27.8 29.3]</td> </tr> <tr> <td>Retardo de tiempo 360</td> <td>T360</td> <td>Trapezoidal</td> <td>[20 20 24.7 26]</td> </tr>	Retardo de tiempo 280	T280	Trapezoidal	[36.3 38.3 40.3 42.8]	Retardo de tiempo 300	T300	Trapezoidal	[31.8 33.8 35.8 37.8]	Retardo de tiempo 320	T320	Trapezoidal	[28.5 30 31.5 33]	Retardo de tiempo 340	T340	Trapezoidal	[25.3 26.8 27.8 29.3]	Retardo de tiempo 360	T360	Trapezoidal	[20 20 24.7 26]
Retardo de tiempo 280	T280	Trapezoidal	[36.3 38.3 40.3 42.8]																		
Retardo de tiempo 300	T300	Trapezoidal	[31.8 33.8 35.8 37.8]																		
Retardo de tiempo 320	T320	Trapezoidal	[28.5 30 31.5 33]																		
Retardo de tiempo 340	T340	Trapezoidal	[25.3 26.8 27.8 29.3]																		
Retardo de tiempo 360	T360	Trapezoidal	[20 20 24.7 26]																		

Las funciones de membresía del conjunto de salida del controlador de velocidad se muestran en la Figura 3.23.

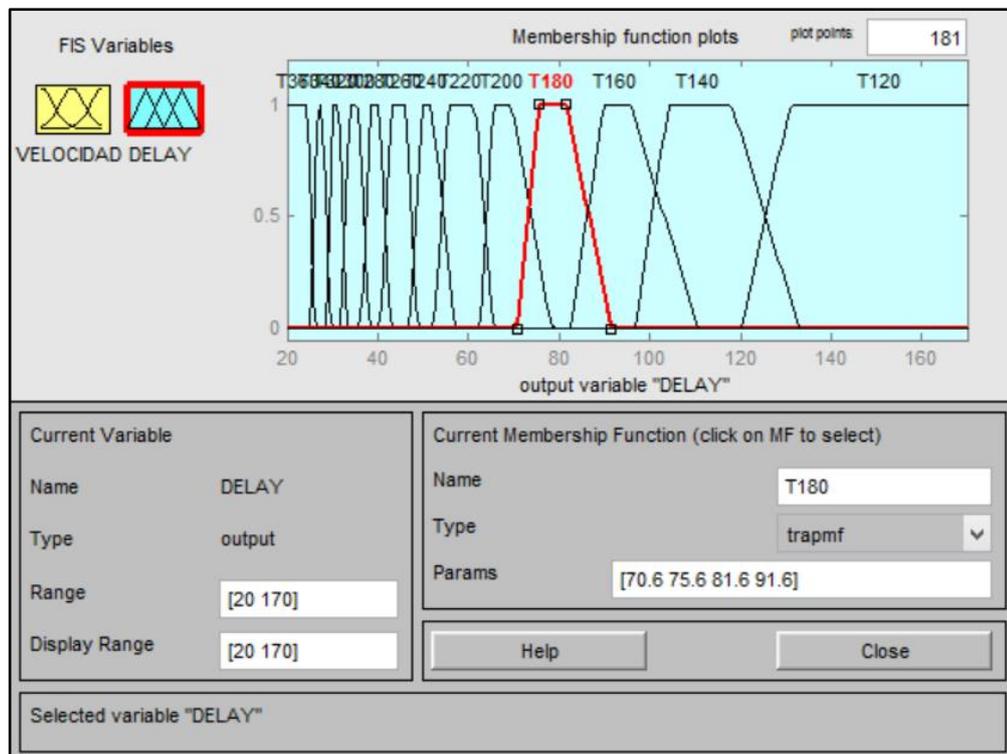


Figura 3.23. Funciones de membresía de salida del controlador de velocidad

- **Reglas de control difusas**

Las funciones de membresía de entrada y de salida, se relacionan como se indica en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18

Reglas de fusificación del controlador de velocidad

N° de Regla	Regla	Etiqueta
1	SI Velocidad es 120, ENTONCES el Retardo de tiempo es 120	SI V120 ENTONCES T120
2	SI Velocidad es 140, ENTONCES el Retardo de tiempo es 140	SI V140 ENTONCES T140
3	SI Velocidad es 160, ENTONCES el Retardo de tiempo es 160	SI V160 ENTONCES T160
4	SI Velocidad es 180, ENTONCES el Retardo de tiempo es 180	SI V180 ENTONCES T180
5	SI Velocidad es 200, ENTONCES el Retardo de tiempo es 200	SI V200 ENTONCES T200
6	SI Velocidad es 220, ENTONCES el Retardo de tiempo es 220	SI V220 ENTONCES T220
7	SI Velocidad es 240, ENTONCES el Retardo de tiempo es 240	SI V240 ENTONCES T240
8	SI Velocidad es 260, ENTONCES el Retardo de tiempo es 260	SI V260 ENTONCES T260
9	SI Velocidad es 280, ENTONCES el Retardo de tiempo es 280	SI V280 ENTONCES T280
10	SI Velocidad es 300, ENTONCES el Retardo de tiempo es 300	SI V300 ENTONCES T300
11	SI Velocidad es 320, ENTONCES el Retardo de tiempo es 320	SI V320 ENTONCES T320
12	SI Velocidad es 340, ENTONCES el Retardo de tiempo es 340	SI V340 ENTONCES T340
13	SI Velocidad es 360, ENTONCES el Retardo de tiempo es 360	SI V360 ENTONCES T360

En la Figura 3.24, se observa las reglas que relacionan las funciones de membresía de entrada con las funciones de membresía de salida en el software de simulación.

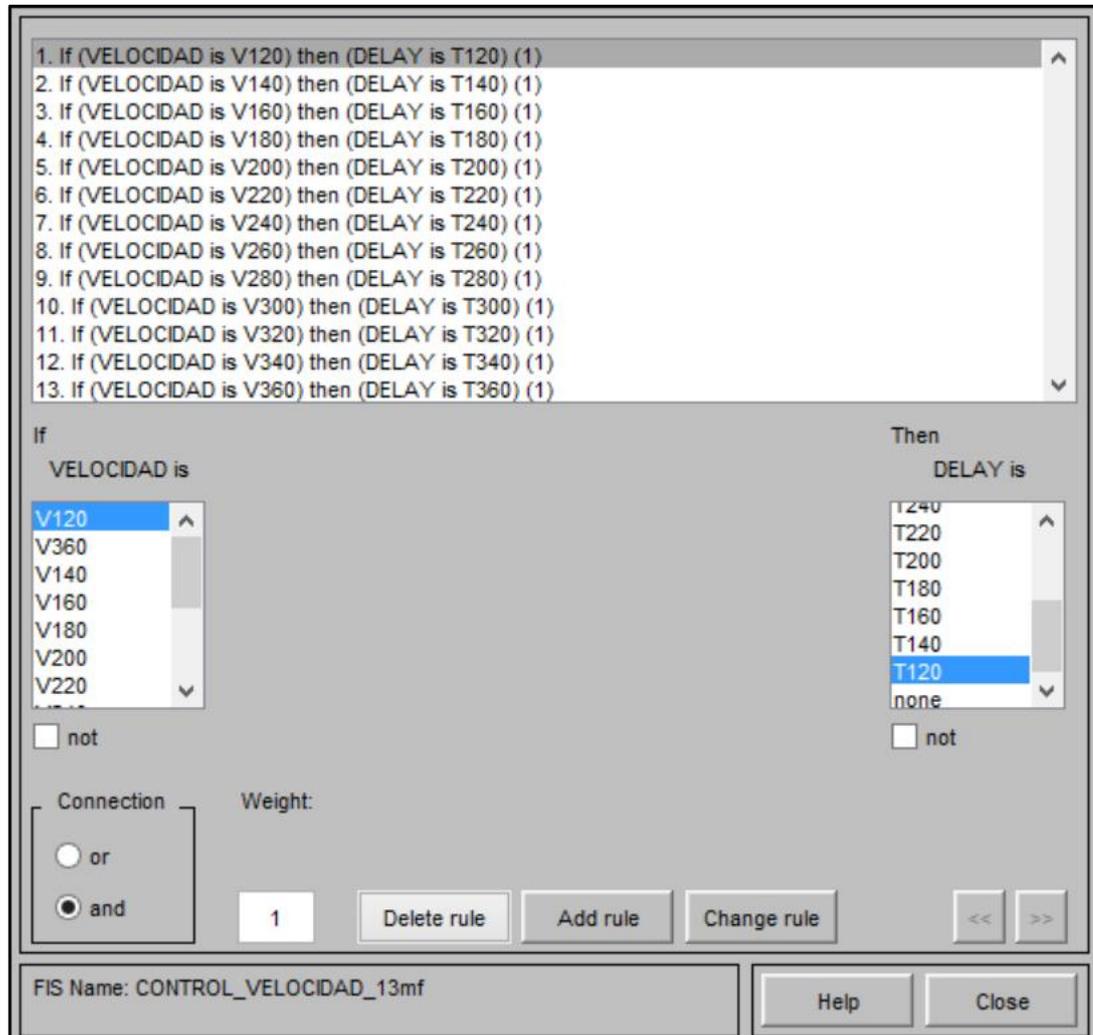


Figura 3.24. Reglas de fusificación del controlador de velocidad

- **Defusificación**

Al igual que para los controladores de los sistemas de temperatura, se utilizará el método del centroide para el cálculo de defusificación del sistema de control difuso. La superficie de control se muestra en la Figura 3.25, en donde se observa la relación que existe entre la entrada y la salida del sistema de control difuso.

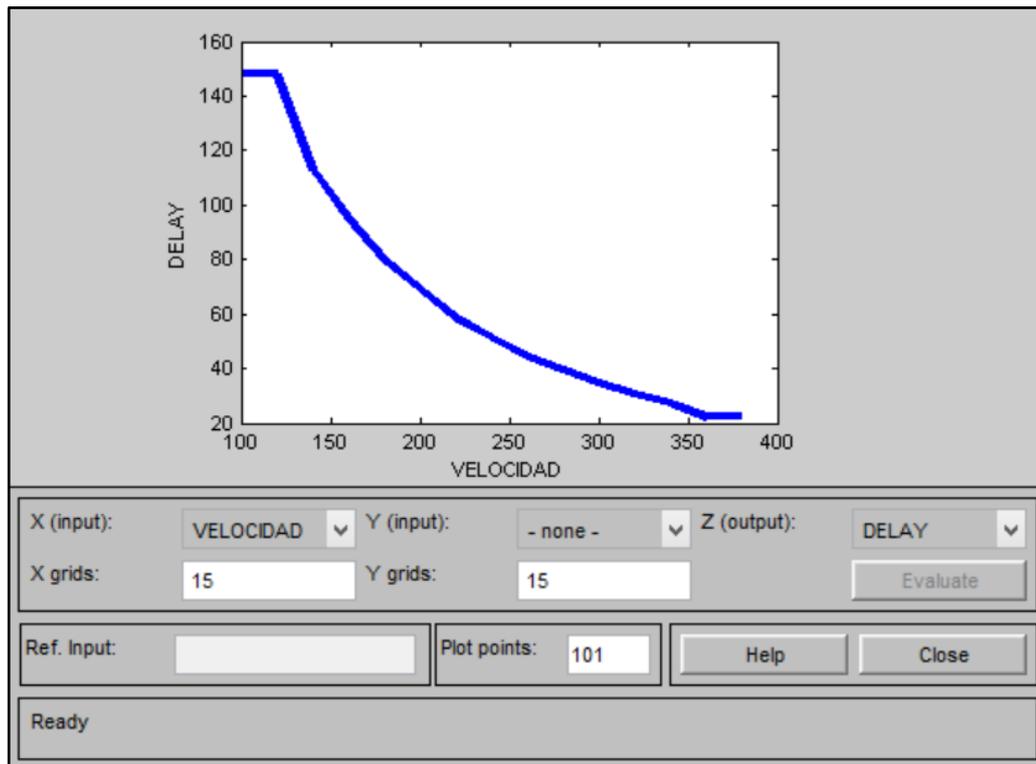


Figura 3.25. Superficie de control del sistema de velocidad

En la Tabla 3.19, se encuentran tabulados algunos valores que adopta la salida del controlador de velocidad en función del valor de entrada del sistema.

Tabla 3.19

Valores de la salida del controlador de velocidad

Velocidad (RPM)	Retardo de tiempo (us)
120	148
140	113
160	95.1
180	80.1
200	69.2
220	58.7
240	51.5
260	44.6
280	39.5
300	34.8
320	30.8
340	27.3
360	22.3

3.4. DISEÑO ELECTRÓNICO

El equipo Hot-Plate requiere de algunos circuitos electrónicos que permitan la conexión de dispositivos con las entradas y salidas del microcontrolador y de otros circuitos para la amplificación y acondicionamiento de las señales de los sensores utilizados. En este apartado, se diseñará los circuitos y las placas PCB para el funcionamiento electrónico del sistema.

Se utilizará un software de simulación electrónica, que permite la simulación y el diseño de circuitos electrónicos, además del diseño de placas PCB a partir de los circuitos simulados.

3.4.1. CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

3.4.1.1. INSTRUMENTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LA TERMOCUPLA TIPO K

Una termocupla es un sensor generador, cuyo funcionamiento se basa en el efecto Peltier y en el efecto Thompson, en donde las juntas de dos metales distintos y homogéneos a distintas temperaturas, generan una corriente eléctrica y un diferencial de voltaje muy pequeño (Pallas Areny, 2005).

Existen varias formas de realizar el acondicionamiento de una termocupla, para la lectura del voltaje que genera. En el equipo Hot-Plate, se utilizará el circuito integrado AD595, que no requiere compensación por junta fría y genera una salida lineal de 10 (mV/°C). En la Tabla 3.20, se presentan las características principales del circuito integrado (Analog Devices, Inc., 1999).

Tabla 3.20

Características del circuito integrado AD595

Denominación	Característica	Unidad
Alimentación	+Vs a -Vs \leq 30	V
Voltaje de salida	Máx: +Vs - 2	V
	Mín: -Vs + 2.5	V
Medición de Temperatura	10	mV/°C
Calibración del error	\pm 3	°C

Fuente: (Analog Devices, Inc., 1999)

El circuito integrado AD595 se compone de 14 pines de conexión con diferentes configuraciones según su aplicación. Se utilizará la configuración de alimentación dual, como se muestra en la Figura 3.26 (Analog Devices, Inc., 1999).

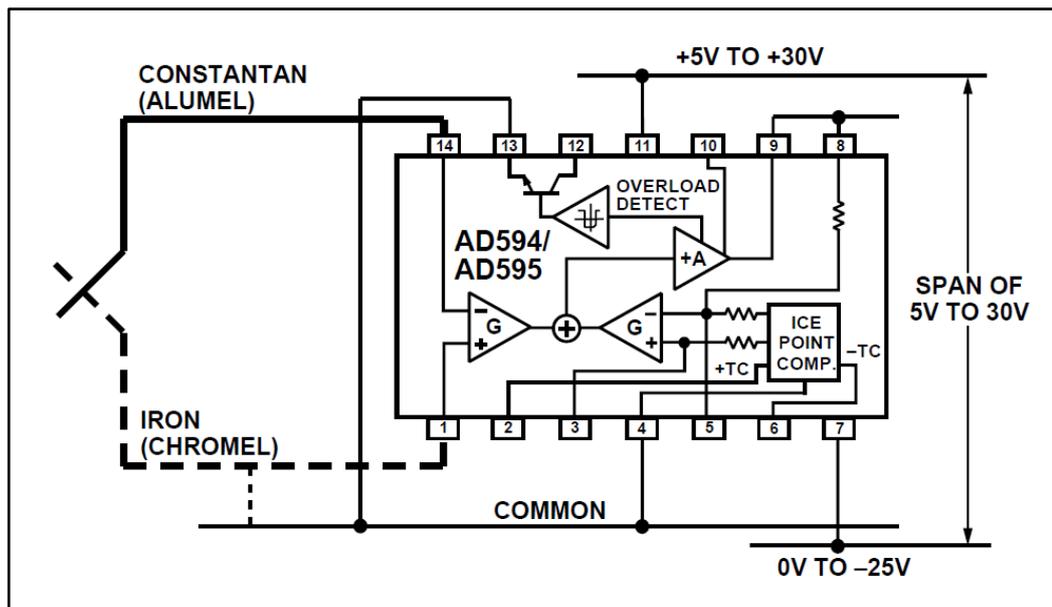


Figura 3.26. Configuración de alimentación dual del C.I. AD595

Fuente: (Analog Devices, Inc., 1999)

El rango de temperaturas de funcionamiento del plato comprende, desde la temperatura ambiente (20°C), hasta la máxima temperatura de 320 (°C). Como se observa en la Tabla 3.20, el +Vs de alimentación deberá ser mayor al voltaje que genere la temperatura máxima sumado 2 (V), en este caso deberá ser superior a 5.2 (V).

Con las características del circuito integrado AD595 resumidas en la Tabla 3.20, el circuito diseñado para la lectura de la termocupla tipo K, se muestra en la Figura 3.27.

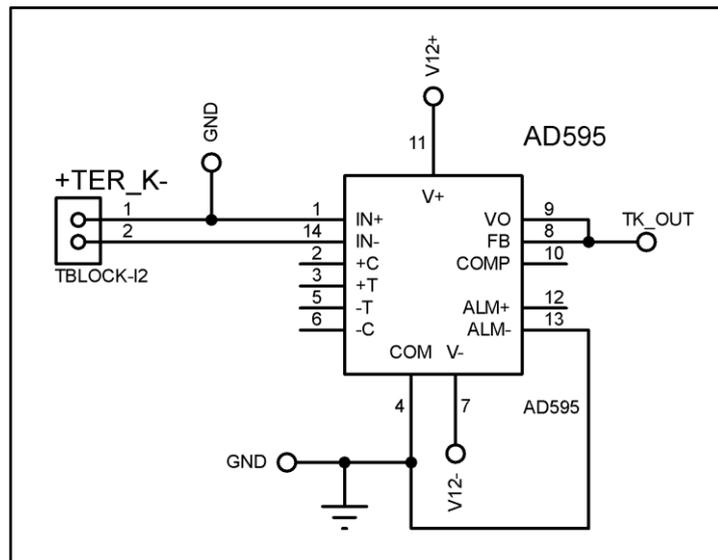


Figura 3.27. Circuito electrónico para la lectura de la termocupla tipo K

3.4.1.2. INSTRUMENTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR RTD TIPO PT100

Un PT100 es un sensor resistivo (RTD), con una resistencia eléctrica de platino (PT) y cuya resistencia a 0 (°C) es de 100 (Ω) (Pallas Areny, 2005).

El sensor cambia su resistencia en función de la temperatura según la ecuación Ec. 3.14 (INGECO Z.S., 2014).

$$R_t = R_o(1 + \alpha T) \quad \text{Ec. 3.14}$$

En donde:

R_o = resistencia a 0°C (Ω)

R_t = resistencia a T°C (Ω)

T = temperatura actual

α = coeficiente de temperatura (0.003850 1/°C)

Se utilizará un circuito conocido como “Puente de Wheatstone” (Figura 3.28), para transformar la señal resistiva en voltaje y el amplificador

operacional AD620, para amplificar la señal de voltaje producido en el circuito (Pallas Areny, 2005).

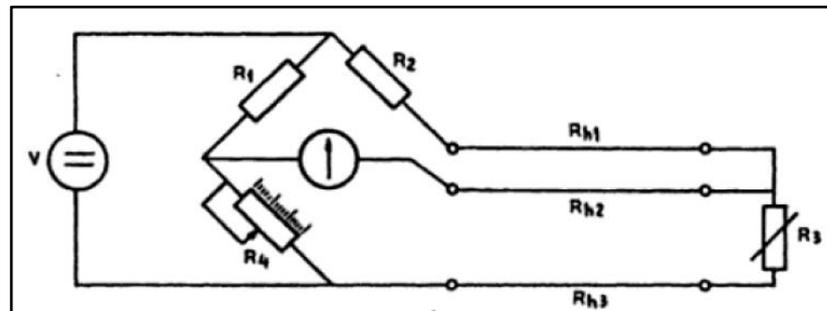


Figura 3.28. Circuito Puento de Wheatstone

Fuente: (Pallas Areny, 2005)

El amplificador operacional AD620, es un circuito integrado que permite amplificar señales pequeñas con ganancia hasta de 1000 unidades. Las principales características del circuito AD620 se presentan en la Tabla 3.21 (Analog Devices, Inc., 2011).

Tabla 3.21

Características del amplificador operacional AD620

Denominación	Característica	Unidad
Alimentación	$V_s = \pm 5$ a ± 15	V
Ganancia	$G = 1 + (49.4\text{k}\Omega / R_G)$	-
Ganancia Máx.	1000	-
Voltaje de salida	Máx: $+V_s - 1.4$	V
	Mín: $-V_s + 2.1$	V
Calibración del error	± 0.7	%

Fuente: (Analog Devices, Inc., 2011)

El circuito integrado AD620, amplifica la señal entre la diferencia existente en los pines $-IN$ y $+IN$. El valor de amplificación dependerá de la resistencia R_G de ganancia que se utilice. El circuito AD620, posee 8 pines como se observa en la Figura 3.29.

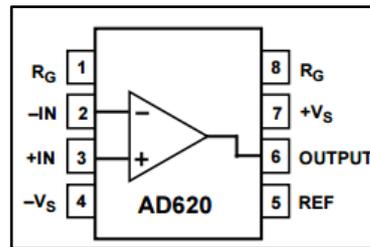


Figura 3.29. Diagrama de conexión del C.I. AD620

Fuente: (Analog Devices, Inc., 2011)

La temperatura máxima permitida para diseñar el circuito, será la temperatura máxima que el PT100 seleccionado pueda leer (200 °C). En la Tabla 3.22, se puede observar los valores de resistencia que adopta el PT100 en diferentes temperaturas según la ecuación Ec. 3.14.

Tabla 3.22

Valores de resistencia del sensor PT100 en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Resistencia (Ω)
0	100,00
10	103,85
20	107,70
30	111,55
40	115,40
50	119,25
60	123,10
70	126,95
80	130,80
90	134,65
100	138,50
110	142,35
120	146,20
140	153,90
160	161,60
180	169,30
200	177,00

El rango de voltaje de funcionamiento del microcontrolador comprende entre [0 5] (V). La mínima temperatura (0°C), debe equivaler al mínimo voltaje (0V) y la máxima temperatura (200°C), debe aproximarse al valor máximo voltaje (5V).

Se diseñará el circuito suponiendo un valor de ganancia aproximado a 100, debido a que los valores generados por el Puente de Wheatstone son pequeños. Se utilizará la ecuación de la ganancia (Ec. 3.15) de la Tabla 3.21, para encontrar el valor de la resistencia R_G .

$$G = 1 + \frac{49.4k\Omega}{R_G} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Remplazando en la ecuación Ec. 3.15 el valor de la ganancia, el valor de R_G sería el valor expresado en la igualdad Ec. 3.16.

$$R_G = 498.99 [\Omega] \quad \text{Ec. 3.16}$$

El valor de la resistencia que se seleccionará será de $R_G = 470 (\Omega)$, por ser una resistencia comercial y de valor más próximo al calculado. La ganancia final del circuito se expresa en la ecuación Ec. 3.17.

$$G = 1 + \frac{49400 \Omega}{470 \Omega} = 106.11 \quad \text{Ec. 3.17}$$

A partir de esta consideración, se dimensionará los componentes del Puente de Wheatstone. Los valores de las resistencias dependerán del valor de ganancia; se considerará a R_1 y R_2 del Puente de Wheatstone (Figura 3.28), como resistencias del mismo valor ® y a la resistencia R_4 de $100 (\Omega)$, para que en estado estable (0°C), cuando R_3 adquiera un valor de $100 (\Omega)$, el valor de amplificación sea cero voltios y el Puente de Wheatstone esté equilibrado (Figura 3.30).

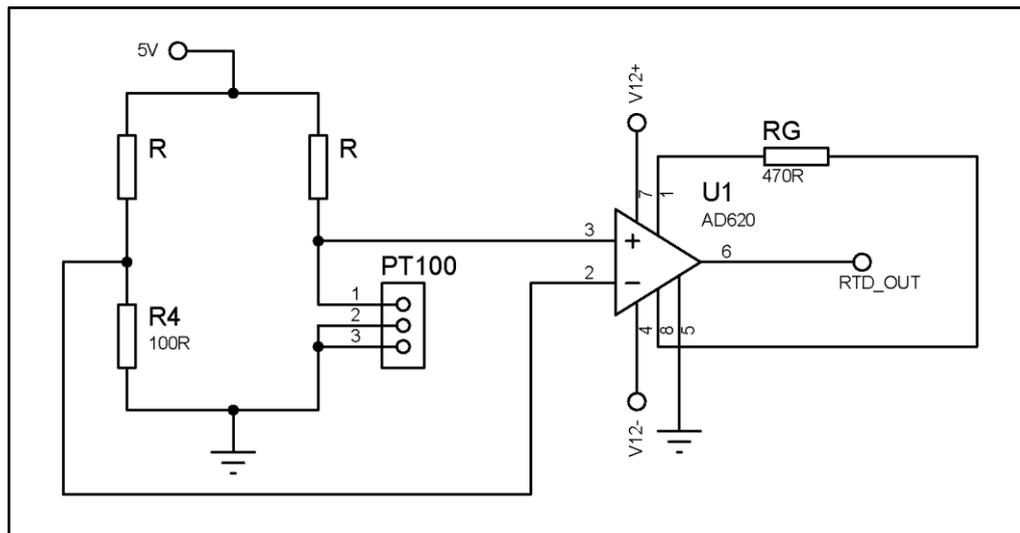


Figura 3.30. Amplificación del Puento de Wheatstone

El voltaje existente entre la resistencia del PT100 y R4, se expresa en la ecuación Ec. 3.18.

$$\Delta V = 5 \left(\frac{R_{PT100}}{R + R_{PT100}} - \frac{R4}{R + R4} \right) \quad \text{Ec. 3.18}$$

El valor del voltaje será máximo, cuando el valor de la resistencia del PT100 sea el mayor posible (Tabla 3.22), por esta razón se realizará el cálculo para cuando $R_{PT100} = 177 \text{ } (\Omega)$. El diferencial de voltaje (ΔV) máximo, tendrá el valor de lectura máximo del microcontrolador (5V), dividido para la ganancia del amplificador operacional AD620 (106.11). Remplazando los valores en la ecuación Ec. 3.18, se genera una igualdad, de donde se puede encontrar el valor de la resistencia R (Ec. 3.19).

$$\frac{5}{106.11} = 5 \left(\frac{177}{R + 177} - \frac{100}{R + 100} \right) \quad \text{Ec. 3.19}$$

Según la ecuación Ec. 3.19, el valor de la resistencia R, será de 7.89 (K Ω), aproximando el cálculo al valor comercial más cercano, el valor de la resistencia R será de 8.2 (K Ω). El circuito final desarrollado para el

acondicionamiento e instrumentación del sensor PT100, se presenta en la Figura 3.31.

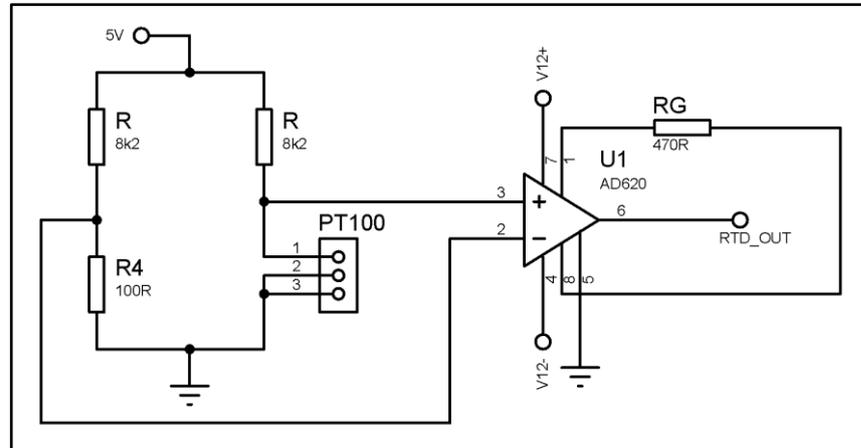


Figura 3.31. Circuito electrónico para la lectura del sensor PT100

3.4.1.3. CONEXIÓN DEL DRIVER A4988

El driver A4988, permite aumentar la velocidad del motor a pasos. Se utilizará el driver, debido a que se necesita un funcionamiento a altas velocidades de giro, que no sobrepasan las 500 (RPM). El driver A4988 posee 16 pines de conexión, que permite diferentes configuraciones que influyen en el funcionamiento del motor a pasos. En la Figura 3.32, se muestra el diagrama mínimo de conexión recomendado (Pololu, 2014).

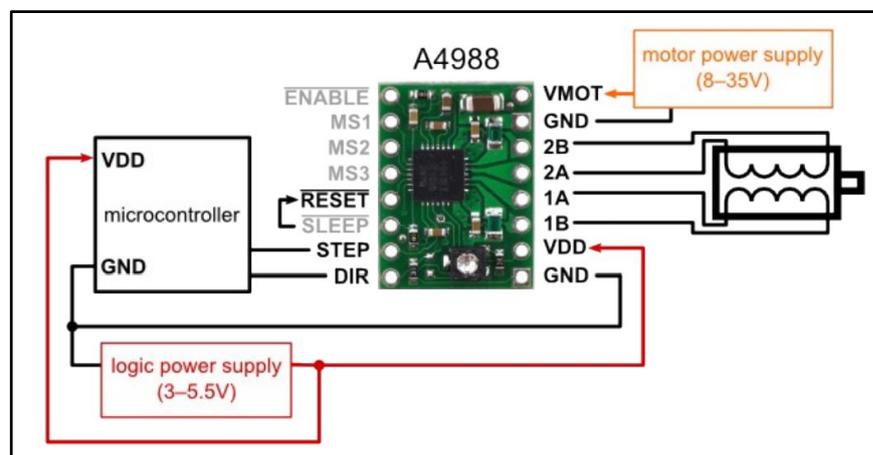


Figura 3.32. Diagrama de conexión mínimo del driver A4988

Fuente: (Pololu, 2014)

Los pines MS1, MS2 y MS3 son los encargados de generar el *microstepping*, dependiendo las combinaciones posibles que se muestra en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23

Tabla de verdad para la resolución del *microstepping*

MS1	MS2	MS3	Resolución del micropaso
L	L	L	Paso completo
H	L	L	Medio paso
L	H	L	Cuarto de paso
H	H	L	Octavo paso
H	H	H	Decimosexto paso

Fuente: (Pololu, 2014)

Se utilizará la resolución de decimosexto paso, para aumentar a la resolución máxima del funcionamiento del motor a pasos. Además, se controlará el pin *STEP* generando un tren de pulsos desde el microcontrolador.

El sentido de giro no es una variable importante en esta aplicación, por esta razón se conectara a 0 (V). Mientras que los pines *RESET* y *SLEEP*, que se encuentran cortocircuitados, se habilitarán con una salida digital del microcontrolador, para poder controlar el funcionamiento del motor cuando sea requerido.

En la Figura 3.33, se detalla el diagrama final de conexión del driver A4988, considerando que la alimentación del motor a pasos Nema 17, es de 12 (VDC) (Tabla 3.1).

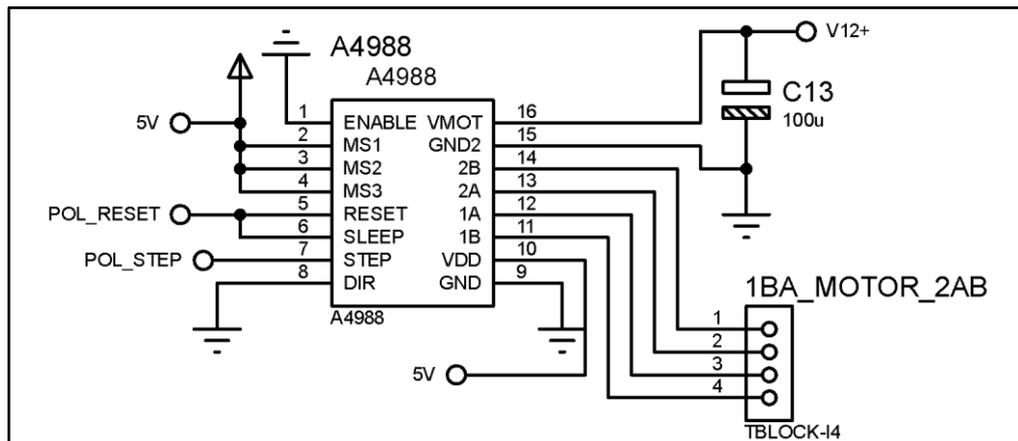


Figura 3.33. Circuito electrónico para el driver A4988 y el motor a pasos Nema 17

3.4.1.4. FUENTES DE ALIMENTACIÓN

Los circuitos integrados utilizados para la lectura de los sensores y el driver A4988, requieren de diferentes voltajes de alimentación (Tabla 3.1, Tabla 3.20 y Tabla 3.21). Los circuitos integrados AD620 y AD595, pueden utilizar fuentes de ± 12 (VDC), mientras que el driver A4988, utiliza 12 (VDC) de alimentación para el motor Nema 17. Por esta razón se diseñará fuentes de ± 12 (VDC), y de 9 (VDC) para la polarización de los microcontroladores Arduino, según la recomendación del fabricante (Arduino, 2015).

Se utilizará un transformador de voltaje de 120 (VAC) a 2x12 (VAC) y un puente de diodos para la rectificación de la corriente alterna a continua. El valor de rizado máximo $\text{\textcircled{R}}$ será del 10% y se calcula a partir de la expresión Ec. 3.20 (Floyd, 2007).

$$r = \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3} * f * CR * V_{cd}} \quad \text{Ec. 3.20}$$

En donde:

r = factor de rizado

I_{dc} = corriente continua

V_{cd} = voltaje continuo

CR = valor del capacitor

f = frecuencia de red eléctrica

El valor de voltaje V_{rms} en la salida del transformador es de 14 (VAC) a 60 (Hz), y la corriente máxima con la que se diseñara cada fuente será de 1 (A). El valor del capacitor para la fuente que se encuentra a partir de la ecuación Ec. 3.20, se muestra en la ecuación Ec. 3.21.

$$CR = \frac{Idc}{4\sqrt{3} * f * r * Vcd} = \frac{1}{4\sqrt{3} * 60 * 0.1 * \frac{14 * 2\sqrt{2}}{\pi}} = 0.0019 (F) \quad \text{Ec. 3.21}$$

El valor comercial más cercano es de 2200 (μF). Reemplazando este valor en la ecuación Ec. 3.20, se obtiene que el valor final de rizado es de 8.7%.

Para la conexión de los circuitos integrados LM7809 y LM7812, encargados de la regulación de voltaje de 9 (VDC) y 12 (VDC), se observó las recomendaciones del fabricante, como se muestra en Figura 3.34 (FAIRCHILD, 2014).

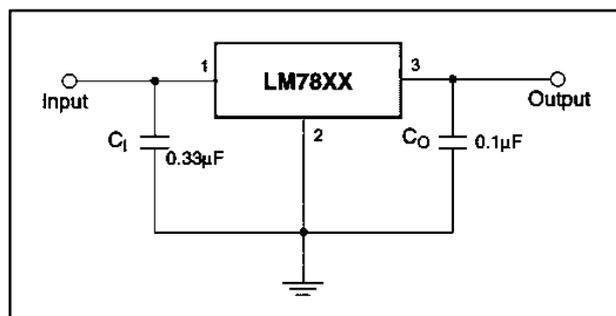


Figura 3.34. Diagrama de conexión para los reguladores de voltaje LM78XX

Fuente: (FAIRCHILD, 2014)

Con las recomendaciones del fabricante y el cálculo del capacitor, para que el rizado sea menor a 10%, el circuito para las fuentes de voltaje positivas se ilustra en la Figura 3.35.

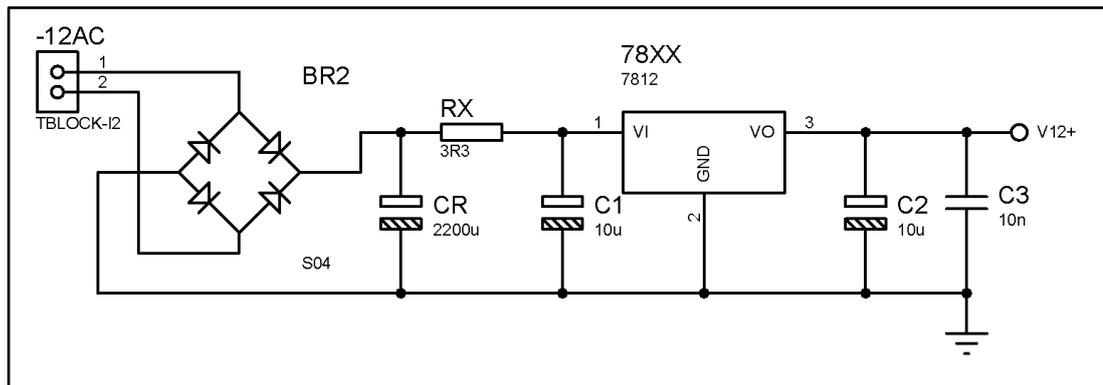


Figura 3.35. Circuito electrónico de conexión de fuentes de voltaje positivas

De igual manera, se revisó las recomendaciones del fabricante para la conexión del circuito integrado LM7912, encargado de regular el voltaje a -12 (VDC), como se observa en la Figura 3.36 (FAIRCHILD, 2014).

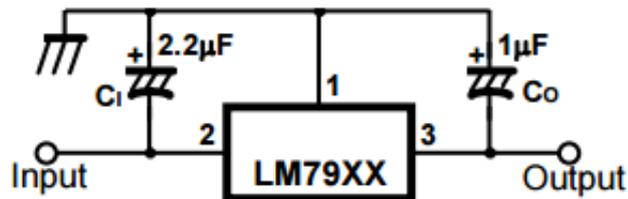


Figura 3.36. Diagrama de conexión para los reguladores de voltaje LM79XX

Fuente: (FAIRCHILD, 2014)

El circuito para las fuentes de voltaje negativas se ilustra en la Figura 3.37.

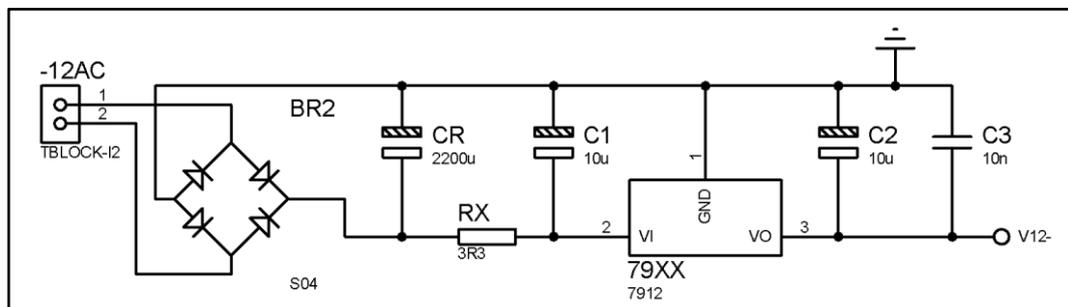


Figura 3.37. Circuito electrónico de conexión de fuentes de voltaje negativas

Los circuitos diseñados para las fuentes de voltaje se muestran en la Figura 3.38, en donde la entrada es el voltaje entregado por el transformador.

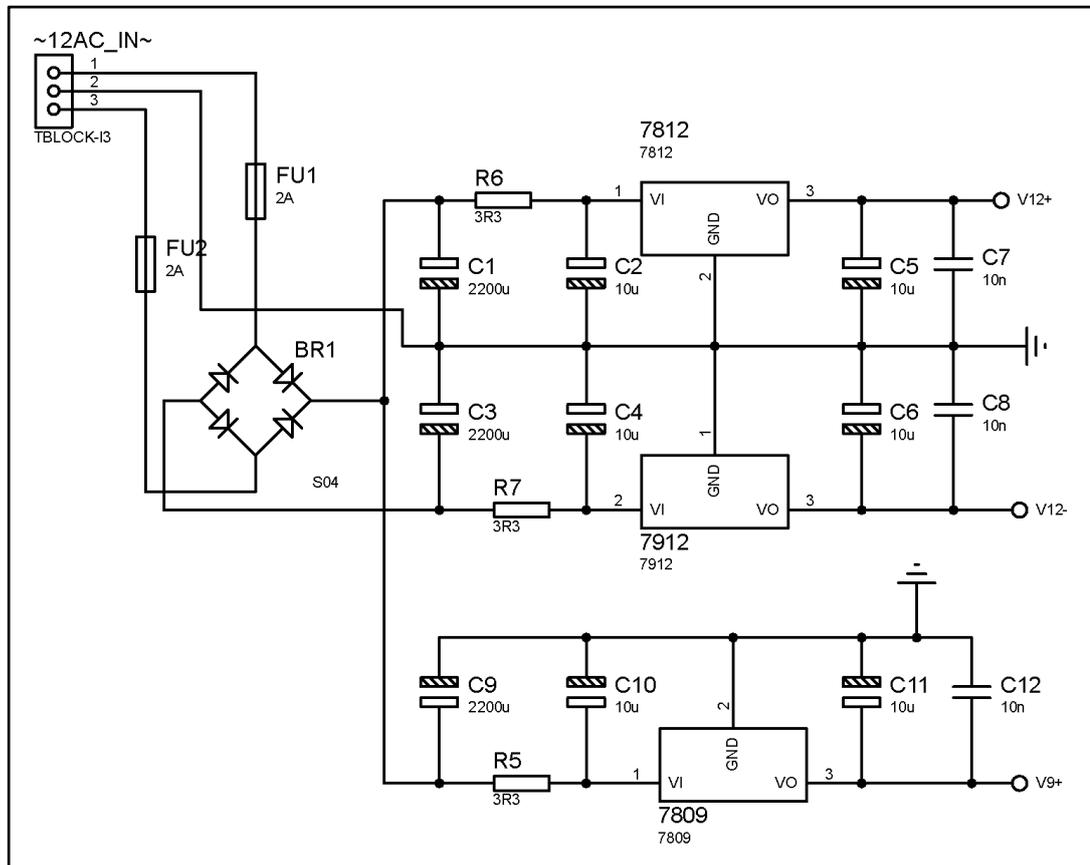


Figura 3.38. Circuito para las fuentes de voltaje de los circuitos electrónicos

Se utilizará los 5 (V) que genera el microcontrolador esclavo (Arduino nano), para la alimentación de los circuitos que requieran de este voltaje.

3.4.1.5. CIRCUITO PARA BOTÓN DE EMERGENCIA

Se utilizará un pulsador autoenclavante que permita detener el funcionamiento del equipo en su totalidad. Este botón será leído por el microcontrolador master (Arduino Mega), de forma que el circuito permita la lectura de 5 (V), cuando se active el botón o 0 (V), cuando no este activo. El circuito propuesto se muestra en la Figura 3.39.

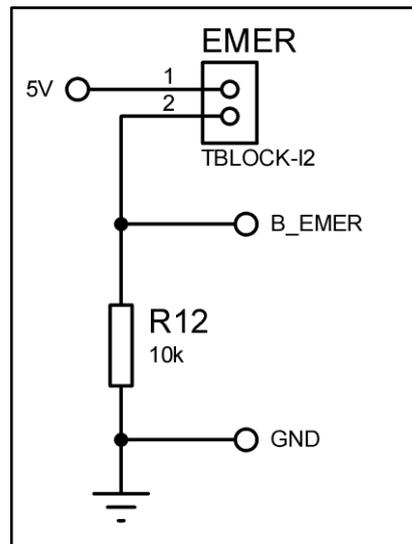


Figura 3.39. Circuito para el botón de emergencia

La resistencia de 10 (K Ω) del circuito de la Figura 3.39, cumple la función de evitar que exista un corto circuito cuando se active el botón.

3.4.2. PLACA ELECTRÓNICA DE CONTROL

Se desarrollará una placa PCB (*Printed Circuit Board*), en donde se montará los circuitos electrónicos y las fuentes requeridas para el control. En esta placa se incluirá los circuitos detallados en el literal 3.4.1, se colocará el microcontrolador embebido (Arduino Nano) y se implementarán conectores, que permitan enviar las señales generadas por los integrados hacia el microcontrolador.

En el equipo se incluirán dos leds: un led de alto brillo de color verde, que indica el funcionamiento del equipo, y un led RGB, que permite ver el modo de funcionamiento cuando el equipo se encuentre en ejecución.

En la Figura 3.40, se observa los conectores implementados que permiten la recepción y envío de datos desde la placa de control hacia el microcontrolador.

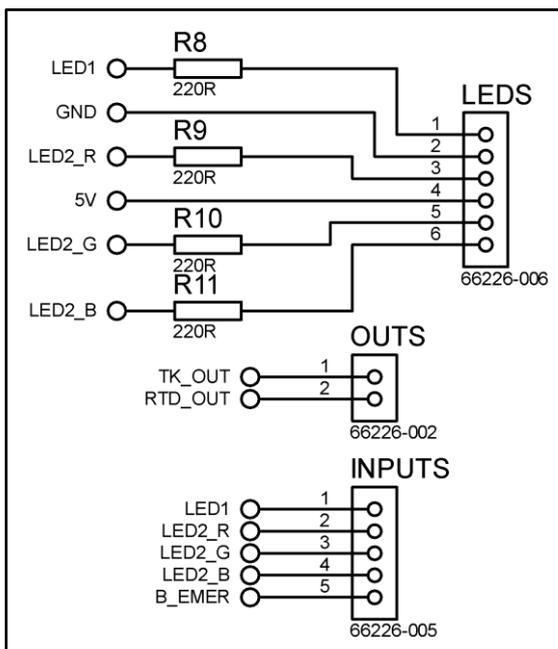


Figura 3.40. Conectores de entrada y salida de la placa PCB de control

Se utilizará conectores para montar el microcontrolador dedicado al funcionamiento del motor, como se observa en la Figura 3.41.

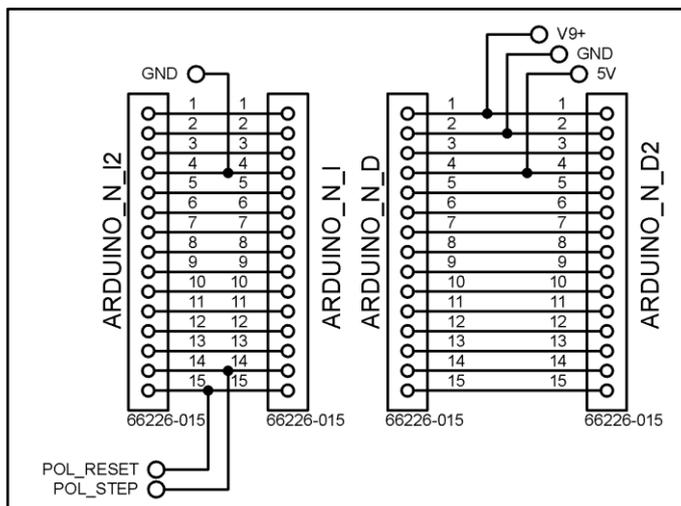


Figura 3.41. Diagrama de montaje del Arduino Nano en la placa de control

La configuración de los pines del Arduino Nano, utilizados para la conexión detallada en la Figura 3.41, fueron tomados a partir del diagrama de conexión de la Figura 3.42 (Arduino, 2015).

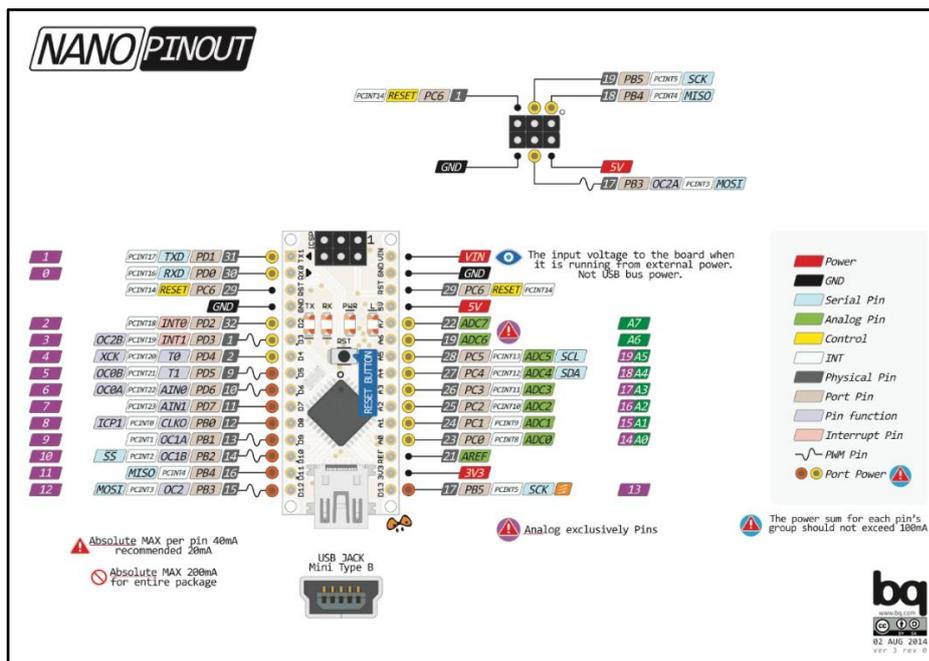


Figura 3.42. Distribución de los pines de conexión del Arduino Nano

Fuente: (Arduino, 2015)

3.4.2.1. CÁLCULO DEL ANCHO DE PISTA

Es importante definir el ancho de pista para rutear la placa PCB del circuito de control. Se utilizará la norma IPC-2221^a, que estandariza el diseño de circuitos impresos PCB (IPC, 2003).

Las variables que intervienen el cálculo del ancho de pista son: temperatura de funcionamiento, corriente máxima y espesor del conductor. En la Tabla 3.24, se resumen las características que se tomarán en cuenta para el cálculo del ancho de pista (IPC, 2003).

Tabla 3.24

Características de operación para el cálculo del ancho de pista de la placa de control

Característica	Descripción	Valor	Unidad
Temperatura Ambiente	Temperatura del lugar en donde funcionará la PCB	30	°C
Temperatura Operativa	Temperatura máxima que soporta el material de la PCB	130	°C
Material	Material de la PCB (1oz/ft ²)	FR-4	-
Corriente máxima	Corriente máxima de circulación por la pista	3	A

Fuente: (IPC, 2003)

Según la norma IPC-2221^a, la temperatura de trabajo (Ec. 3.22), es la diferencia entre la temperatura operativa y la temperatura ambiente (IPC, 2003).

$$Tr = Top - Tamb$$

Ec. 3.22

Tomando en consideración los datos de la Tabla 3.24 y remplazando en la ecuación Ec. 3.22, el valor de la temperatura de trabajo sería de 100 (°C). En la Figura 3.43, se representa el cruce entre la temperatura de trabajo, con la corriente máxima de 3 (A), correspondiente a una sección aproximada de 20 unidades en el eje x (IPC, 2003).

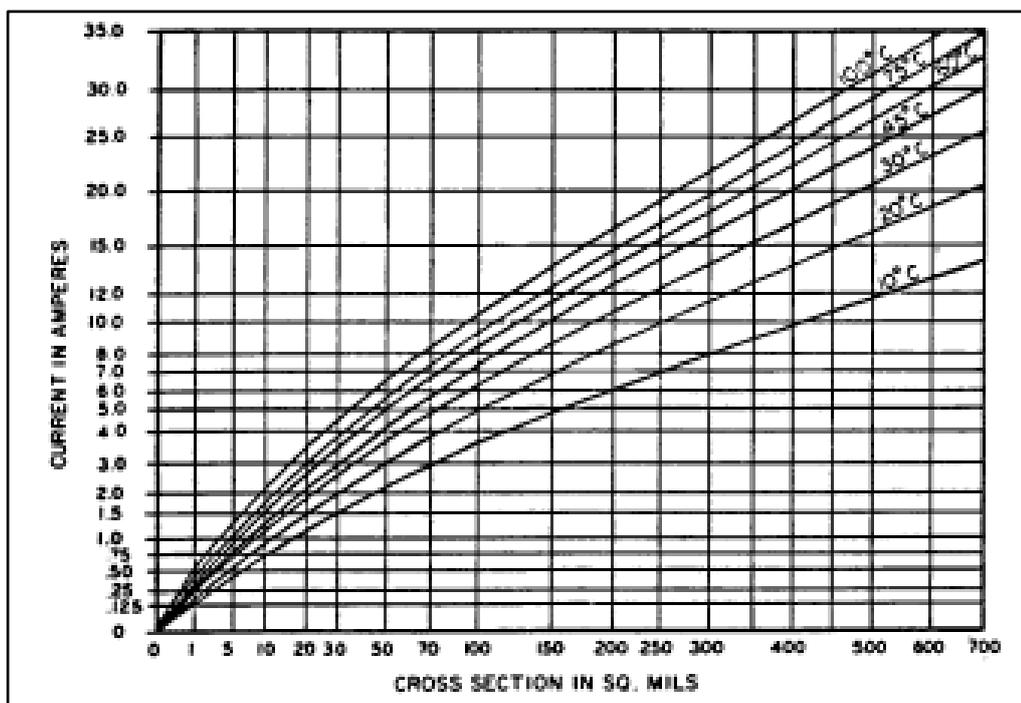


Figura 3.43. Selección del ancho de pista en función de la temperatura de trabajo

Fuente: (IPC, 2003)

El material de fabricación para la PCB será fibra de vidrio de 1oz (Tabla 3.24). La curva de la Figura 3.44, permite encontrar el ancho de pista con la información obtenida de la Figura 3.43 (20 mils). El ancho de pista será no menos de 20 (Th) (IPC, 2003).

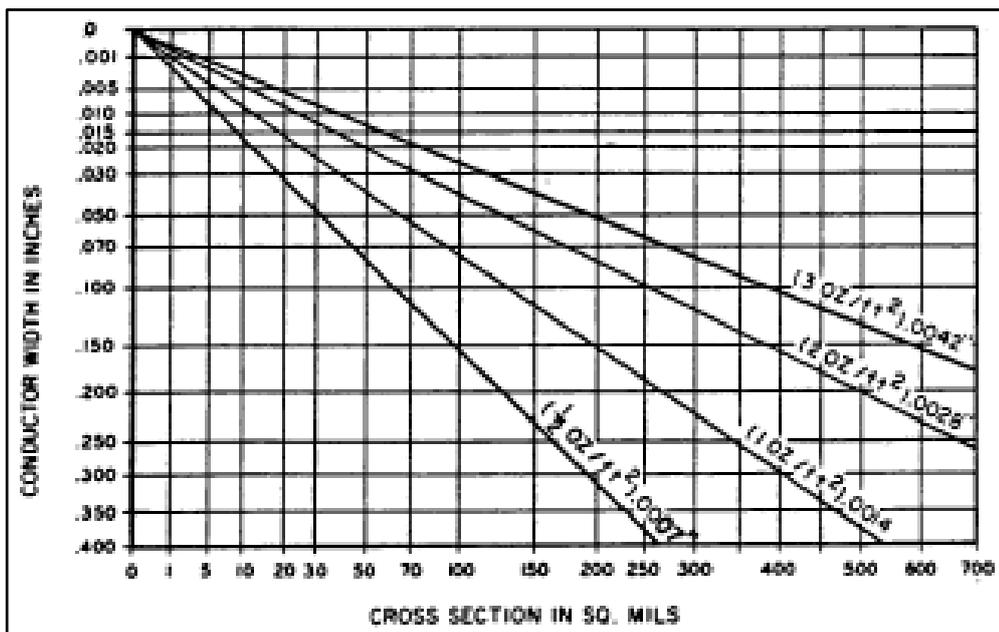


Figura 3.44. Selección del ancho de pista en función del material de la PCB

Fuente: (IPC, 2003)

Se utilizará un ancho de pista de 30 (Th), para no utilizar el mínimo calculado. La distribución y el ruteo final de los circuitos electrónicos considerados para la placa de control, con las consideraciones mencionadas, se muestran en la Figura 3.45.

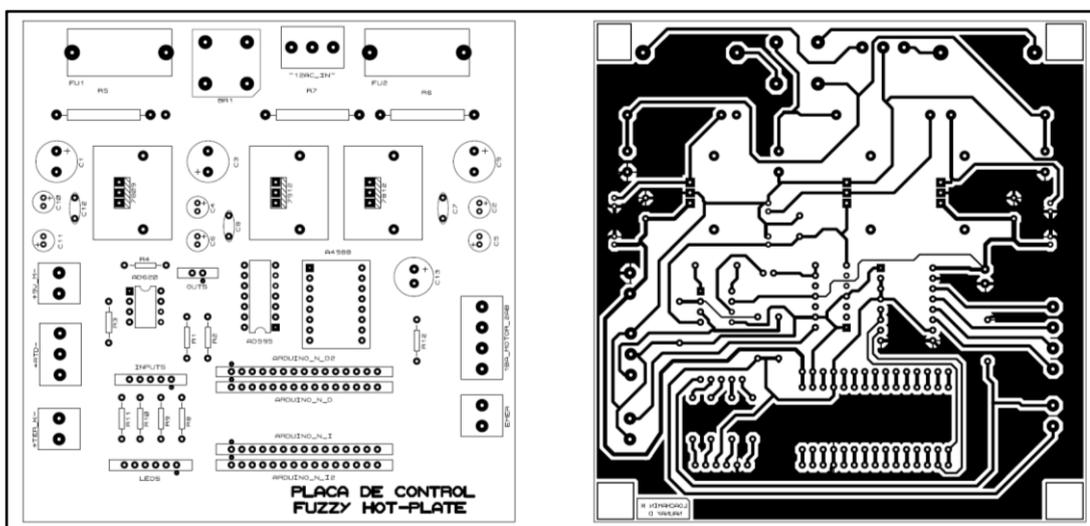


Figura 3.45. Placa PCB de control

3.4.3. CIRCUITOS ELÉCTRICOS

3.4.3.1. CIRCUITO DE CONMUTACIÓN AC

Este circuito se utilizará para variar la potencia en la resistencia plana y de esa forma, la temperatura en el plato y en el fluido. El circuito de conmutación AC (Figura 3.46), se compone de un optoaislador (MOC3041) y un de triac (BT139-600), que permiten variar la onda alterna, mediante una señal PWM en la entrada del optoaislador (FAIRCHILD, 2010).

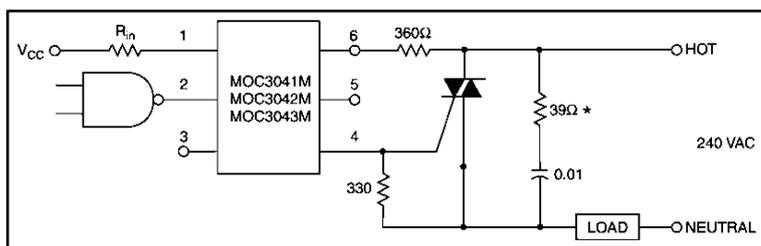


Figura 3.46. Circuito de conmutación de corriente alterna

Fuente: (FAIRCHILD, 2010)

Adicionalmente al circuito recomendado por el fabricante de los circuitos integrados, se añadirá un relevador, que se utilizará como *switch*, siendo un sistema alternativo para prevenir el mal funcionamiento del equipo. Las señales PWM y de activación del relevador, provendrán del microcontrolador maestro (Arduino Mega). El circuito propuesto para controlar la potencia de la resistencia plana, se muestra en la Figura 3.47.

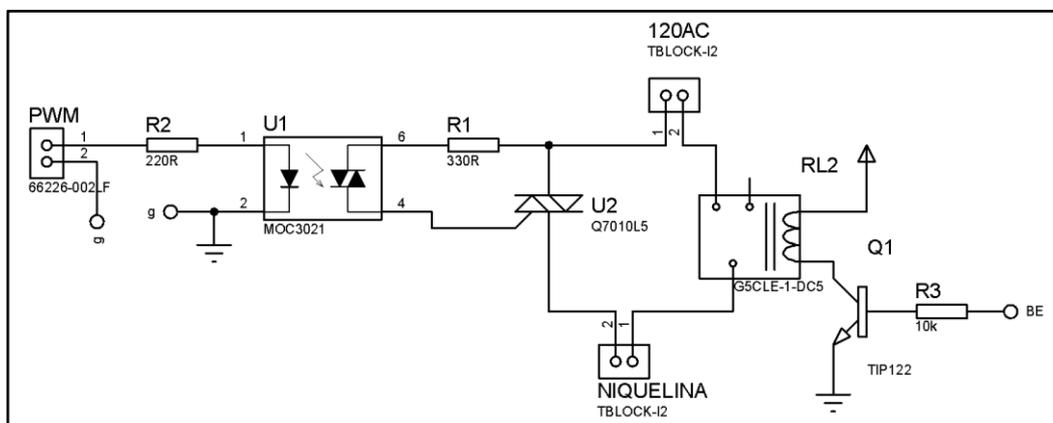


Figura 3.47. Circuito para el control de potencia en la resistencia plana

3.4.3.2. CIRCUITO DE ALARMA AUDITIVA

Este circuito, generará una alerta sonora controlada por el microcontrolador maestro, para advertir sobre algún evento al usuario. Se usará un *buzzer* encargado de generar la alerta sonora. El circuito propuesto se muestra en la Figura 3.48.

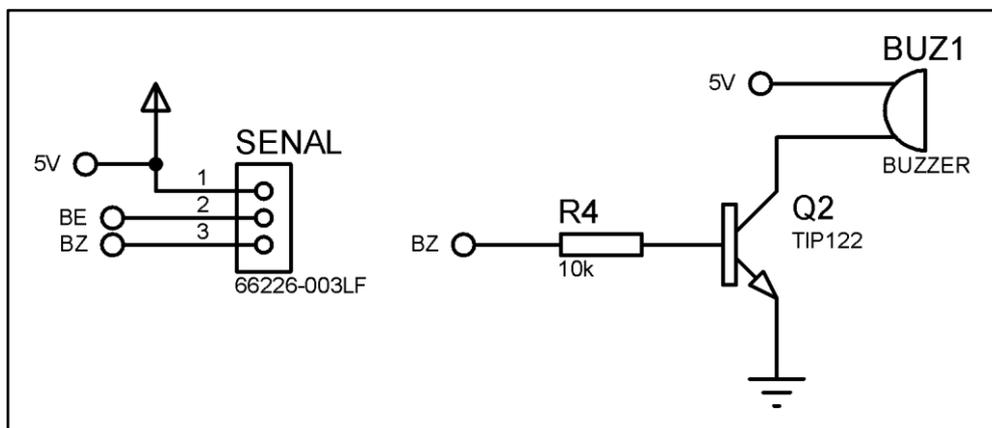


Figura 3.48. Circuito electrónico de alarma auditiva

3.4.4. PLACA ELÉCTRICA DE POTENCIA

Se desarrollará una placa PCB (*Printed Circuit Board*), en donde se montará el circuito de conmutación AC y el circuito de alarma auditiva. En esta placa, se implementarán conectores para recibir las señales desde el microcontrolador.

3.4.4.1. CÁLCULO DEL ANCHO DE PISTA

Al igual que en el diseño de la placa de control, se utilizará la norma IPC-2221^a, que estandariza el diseño de circuitos impresos PCB (IPC, 2003).

En la

Tabla 3.25, se resumen las características que se tomarán en cuenta para el cálculo del ancho de pista de la placa de potencia (IPC, 2003).

Tabla 3.25**Características operativas para el cálculo del ancho de pista placa de potencia**

Característica	Descripción	Valor	Unidad
Temperatura Ambiente	Temperatura del lugar en donde funcionará la PCB	30	°C
Temperatura Operativa	Temperatura máxima que soporta el material de la PCB	130	°C
Material	Material de la PCB (1oz/ft ²)	FR-4	-
Corriente máxima	Corriente máxima de circulación por la pista	10	A

Fuente: (IPC, 2003)

La temperatura de trabajo sería de 100 (°C), de igual manera que la placa de control. La resistencia plana es de 600 (W) a 120 (VAC), considerando un factor de seguridad de 2, la corriente máxima sería de 10 (A). En la Figura 3.43, se representa el cruce entre la temperatura de trabajo, con la corriente máxima de 10 (A), correspondiente a una sección aproximada de 100 unidades en el eje x (IPC, 2003).

El material de fabricación para la PCB será fibra de vidrio de 1 onza (Tabla 3.25). La curva de la Figura 3.44, permite encontrar el ancho de pista con la información obtenida de la Figura 3.43 (100 mils). El ancho de pista debe ser mayor a 80 (Th) (IPC, 2003).

Se utilizará un ancho de pista de 30 (Th), para las conexiones electrónicas y un ancho de pista de 150 (Th), para las conexiones eléctricas, con el fin de disminuir el calentamiento de la placa debido a la corriente permisible. La distribución y el ruteo final de los circuitos eléctricos considerados para la placa de potencia, con las consideraciones mencionadas, se muestran en la Figura 3.49.

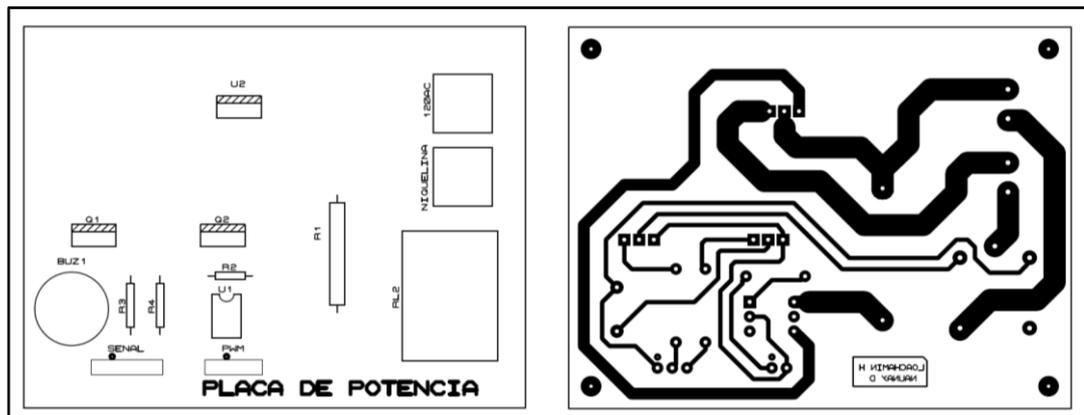


Figura 3.49. Placa PCB de potencia

3.5. DISEÑO MECÁNICO Y ESTRUCTURAL

En este apartado, se desarrollará el diseño de la estructura y los componentes mecánicos que conforman el equipo Hot-Plate. Se utilizará un software de diseño CAD, para realizar el diseño y simulación de cada parte del equipo.

Para el diseño del equipo, se parte del análisis de los posibles procesos de manufactura que intervendrán en el desarrollo de la estructura. Se ha seleccionado dos formas de diseño, como se observa en la Figura 3.50.

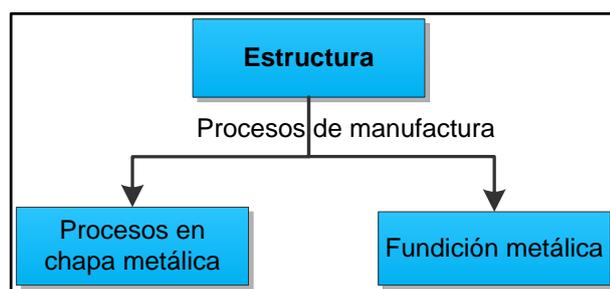


Figura 3.50. Opciones de procesos de manufactura para el diseño de la estructura

La fundición metálica tiene grandes ventajas sobre el desarrollo de estructuras en chapa metálica, en especial cuando los elementos son producidos en serie. En el caso de este proyecto, realizar una estructura en fundición, eleva los costos del prototipo, por esta razón se opta por realizar la estructura del equipo en chapa metálica.

3.5.1. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

La estructura se realizará en Acero Inoxidable AISI 304. El diseño de la estructura depende del espacio físico que requieren todos los componentes electrónicos para poder ser acoplados en el interior de la estructura del equipo.

Por esta razón, el diseño se ha realizado mediante la metodología resumida en la Figura 3.51.

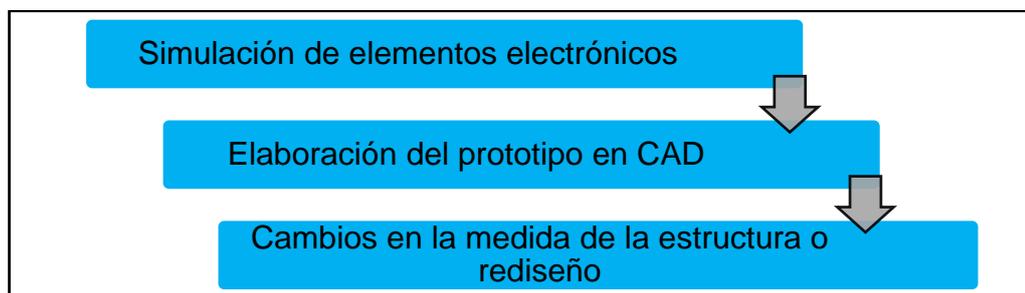


Figura 3.51. Metodología para el diseño estructural

Cada parte que conforma el equipo, y se mencione en el desarrolló del diseño mecánico y estructural, se encuentra detallada en los planos mecánicos adjuntos en el capítulo de anexos.

3.5.1.1. ESTRUCTURA BASE

Es importante que en el equipo se separe en dos partes: una parte en la que los sistemas eléctricos y electrónicos puedan funcionar según lo requerido, y otra parte, en donde la resistencia plana pueda entrar en funcionamiento y no influya en el resto de sistemas.

A la primera parte, se la denominará estructura base, encargada de contener todos los sistemas electrónicos y de protegerlos contra el calor producido por la resistencia plana ubicada en el plato, y proteger al sistema contra posibles derrames de fluidos. La segunda parte, es el plato térmico y las partes que lo conforman, en donde se encontrará la resistencia plana.

Se ha tomado en cuenta la ubicación y espacio físico que ocupan los siguientes elementos, para el diseño de la estructura base:

- Pantalla TFT SainSmart de 4.3''

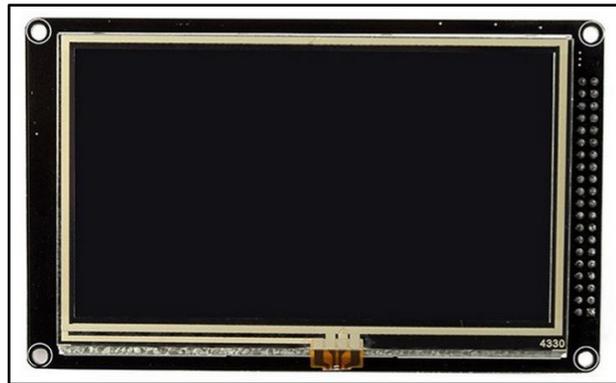


Figura 3.52. Pantalla touch SainSmart, 4.3''

Fuente: (SainSmart, 2014)

- Switch On/Off (Figura 3.53)



Figura 3.53. Switch on/off rojo

- Pulsador autoenclavante (Figura 3.54)



Figura 3.54. Led autoenclavante rojo

- Leds de alerta (Figura 3.55)



Figura 3.55. Leds indicadores

- Placa de control (Figura 3.45)
- Placa de potencia (Figura 3.49)
- Arduino Mega (Figura 2.22)
- Motor a pasos Nema 17 (Figura 2.20)

En la Figura 3.56, se muestra una vista de la estructura base simulada en el software CAD.

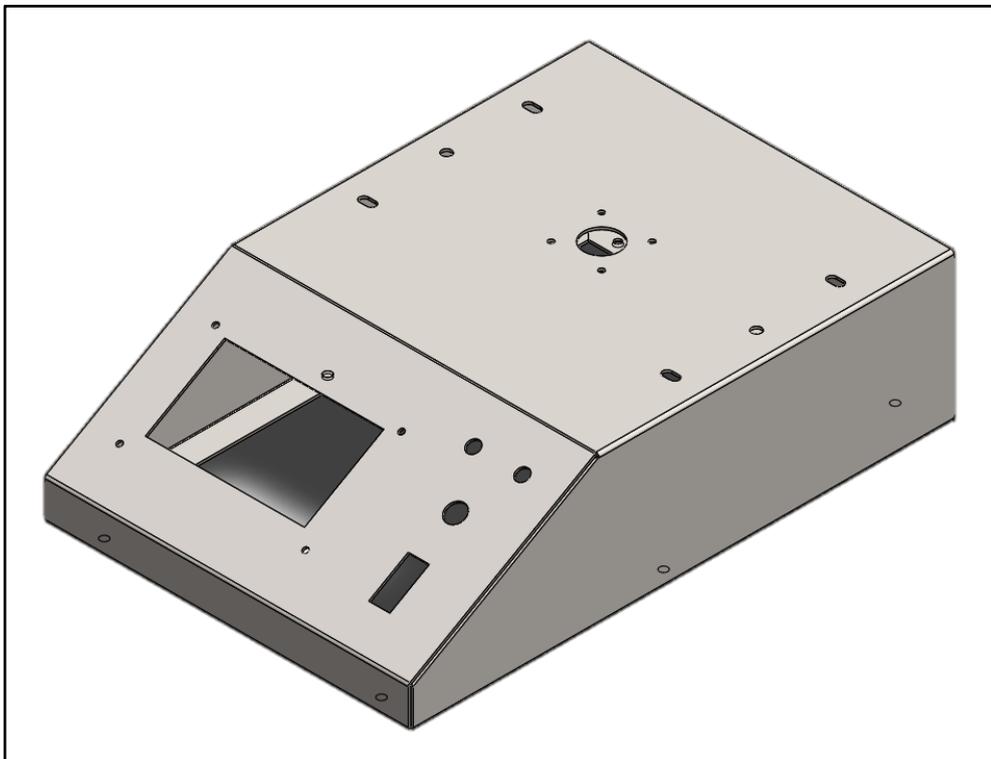


Figura 3.56. Vista isométrica de la estructura base del equipo

Las perforaciones y cortes de la estructura de la Figura 3.56, se han realizado a partir de los datos y de las medidas de cada componente, especificados en sus hojas técnicas. En la Figura 3.57, se observa la ubicación de cada componente en la estructura base.

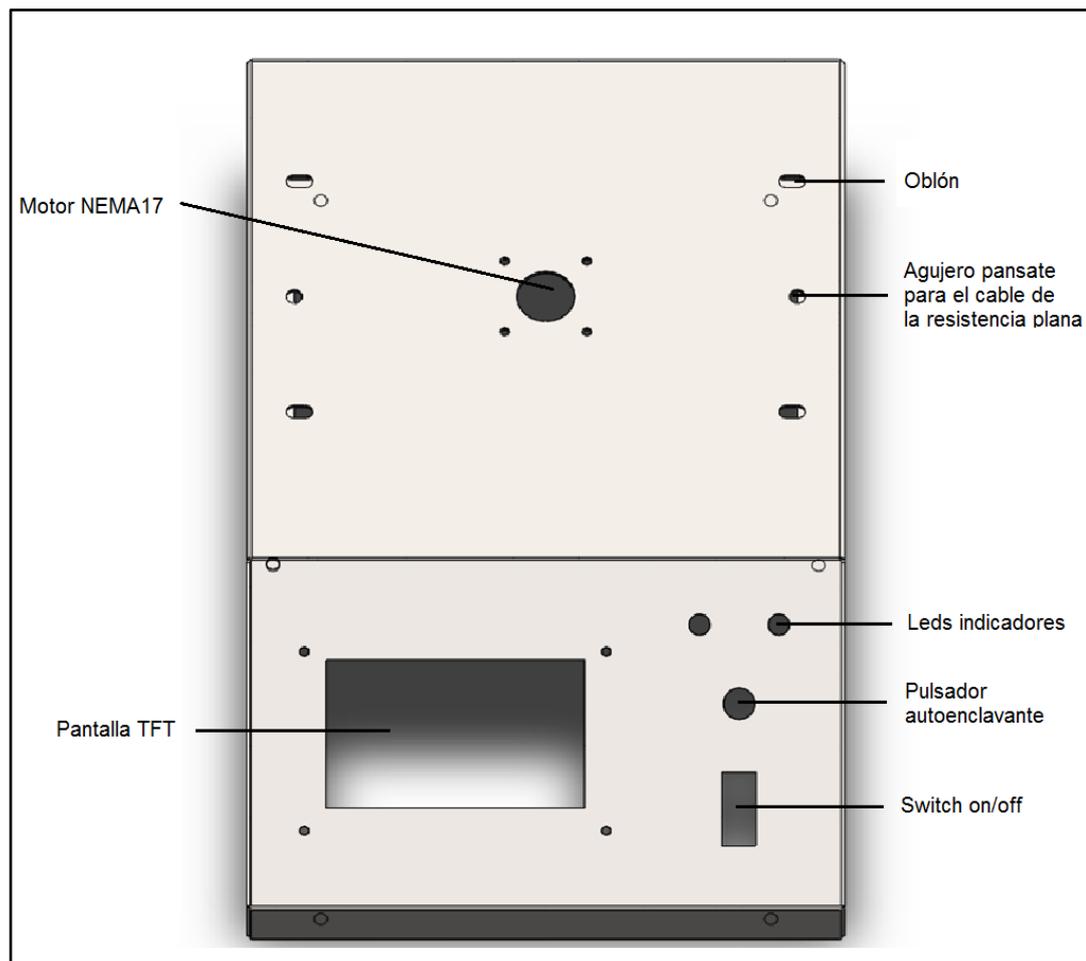


Figura 3.57. Descripción de las perforaciones y cortes de la estructura base

Los cables de los sensores pasarán por dos agujeros. El cable de la termocupla pasará por el agujero por donde pasa el cable de la resistencia plana. El cable del sensor RTD, pasará por un agujero realizado en la parte posterior del equipo. De igual manera, el cable principal que alimenta al equipo con energía eléctrica, pasará por una perforación ubicada en la parte posterior del equipo. En la Figura 3.58, se muestra el detalle de los orificios posteriores en el equipo Hot-Plate.

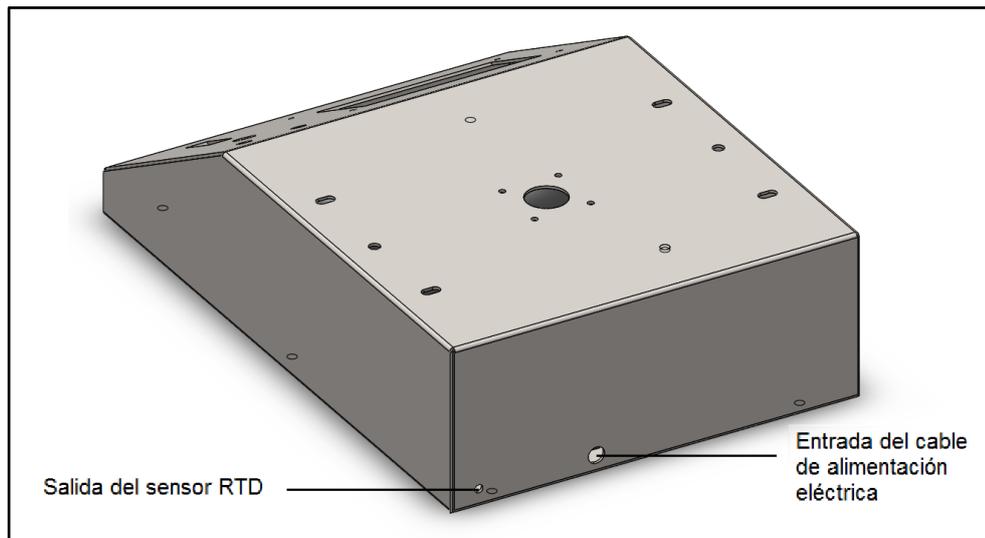


Figura 3.58. Orificios posteriores en la estructura base

3.5.1.2. TAPA PRINCIPAL

La estructura base se ha diseñado de forma que su parte inferior sea hueca. La tapa principal es el elemento que cierra por la parte inferior al equipo Hot-Plate y que contiene a las placas electrónicas, a los microcontroladores y al transformador. Esta tapa protege y aísla a todos estos componentes del exterior. En la Figura 3.59, se observa a la tapa principal y el montaje de algunos elementos simulados, para verificar que el espacio de la estructura base, sea suficiente para alojar a todos estos componentes.

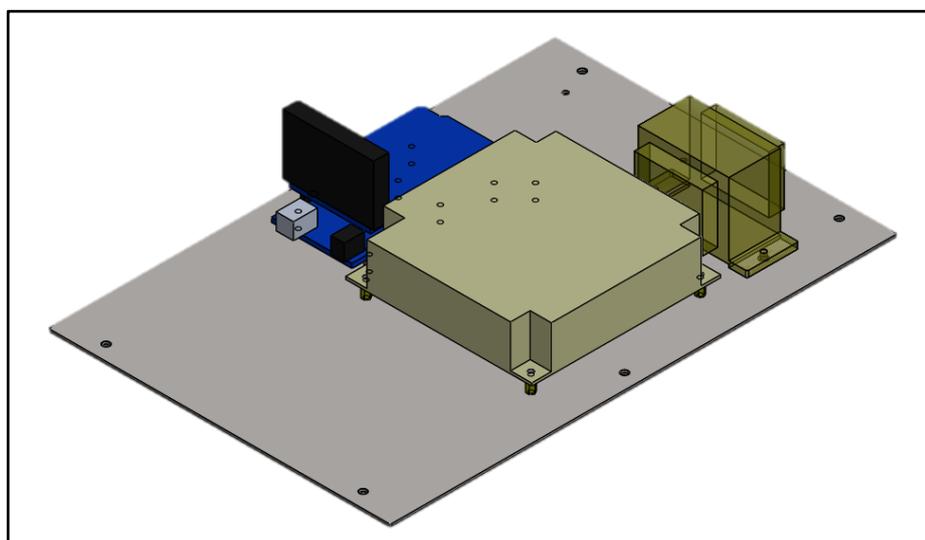


Figura 3.59. Simulación de la tapa principal y de elementos electrónicos

Las perforaciones que se presentan en la tapa principal (Figura 3.59), son utilizados para acoplar la estructura base y a la tapa mediante tornillos.

3.5.1.3. PLATO TÉRMICO Y ELEMENTOS AISLANTES

El plato térmico es el elemento que resiste el calor producido por la resistencia plana, pues está en contacto directo con este elemento. Por esta razón, el plato debe tener el tamaño suficiente para alojar los recipientes, en los que se preparan las diferentes sustancias del laboratorio de biotecnología.

De igual manera, debe tener el tamaño mínimo requerido para alojar la resistencia plana dimensionada en el literal 3.2.2. En la Figura 3.60, se muestra el diseño del plato térmico encargado de la transmisión de la energía térmica.

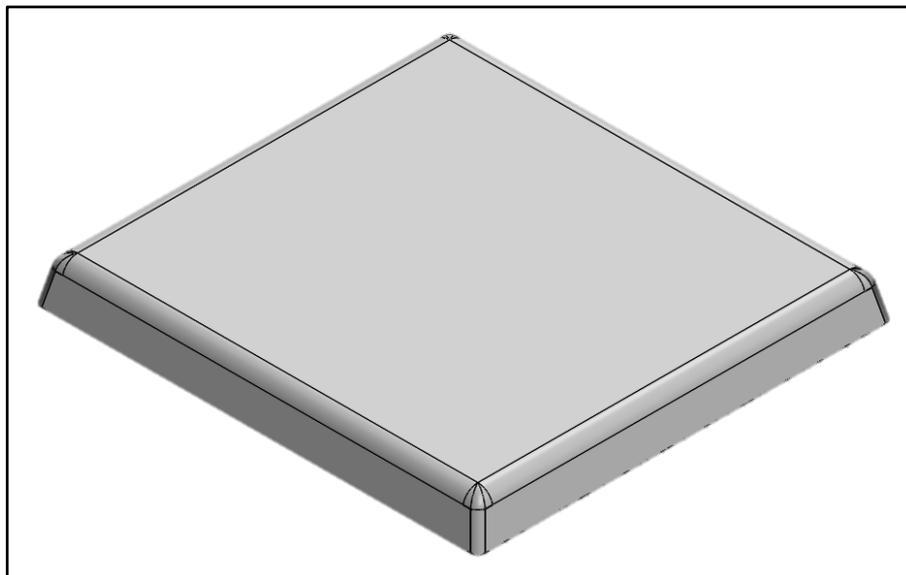


Figura 3.60. Plato térmico

El plato térmico (Figura 3.60), necesita otros elementos para poder aislar el calor que produce la resistencia plana hacia la parte inferior, y otros componentes que permitan separar a la estructura base del sistema térmico, para reducir el tiempo de transferencia de calor entre estos dos componentes.

Se ha diseñado tapas térmicas (Figura 3.61), que son planchas de chapa metálica de acero inoxidable, cuya función es aislar el calor generado en el plato térmico.

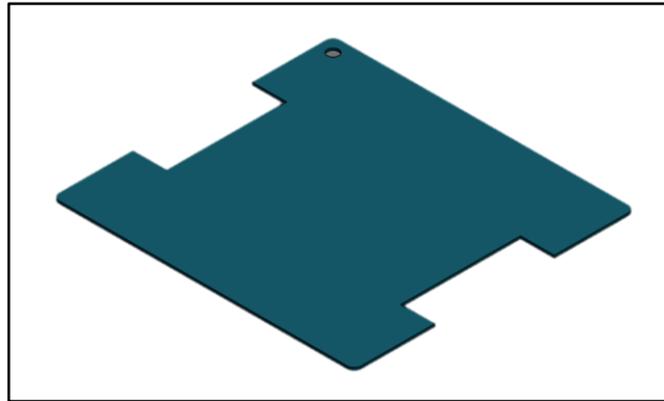


Figura 3.61. Tapa térmica

La tapa térmica, se ha simulado de manera que los cables de conexión de la níquelina plana, puedan pasar por la parte lateral de este componente. Además, posee una perforación, cuya función es acoplar la termocupla mediante un tornillo y una tuerca.

La tapa térmica principal (Figura 3.62), se ha diseñado con las mismas características de la tapa térmica, con la diferencia de que posee una perforación adicional, en donde encaja el porta-imanes acoplado al motor. Entre las tapas térmicas, se colocará lana de vidrio, para aumentar el aislamiento de calor hacia la estructura base. De esta manera el tiempo de transferencia de calor hacia la estructura será mucho mayor.

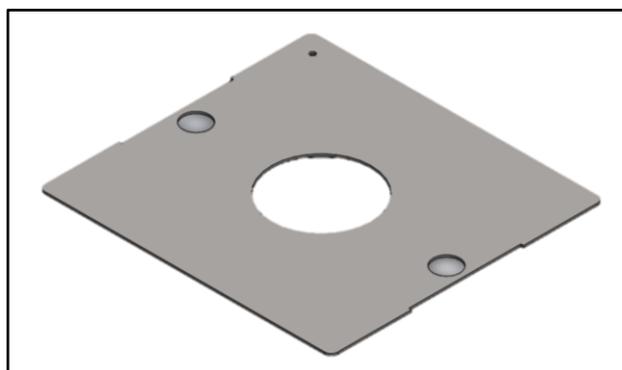


Figura 3.62. Tapa térmica principal

Otros componentes importantes, son los ganchos (Figura 3.63) que permiten sostener con apriete, al plato sobre la estructura base.

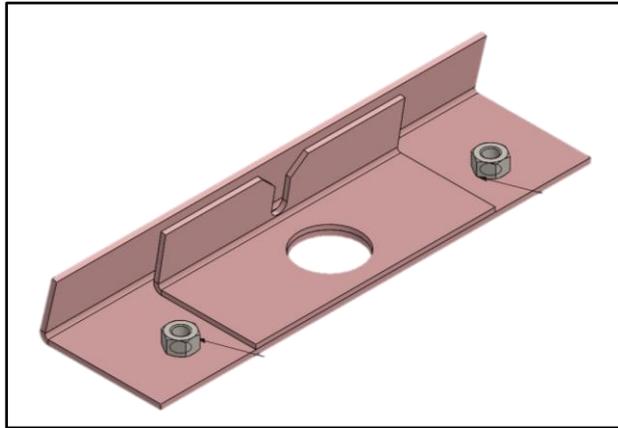


Figura 3.63. Gancho de sostén para el plato térmico

Las alzas (Figura 3.64), son los componentes que elevan al plato sobre la estructura base. Sus agujeros cumplen la función de permitir el paso de tornillos que sujetan los ganchos y la estructura base.

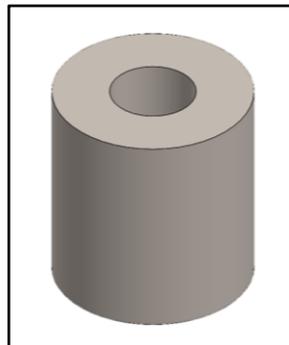


Figura 3.64. Alza del plato

3.5.1.4. PORTA-IMANES

Otro elemento importante, es una pequeña pieza manufacturada en aluminio, en donde los imanes encargados de la atracción magnética, son pegados mediante una pega industrial. Este porta-imanés (Figura 3.65), se acoplará al motor mediante un sistema de prisioneros.

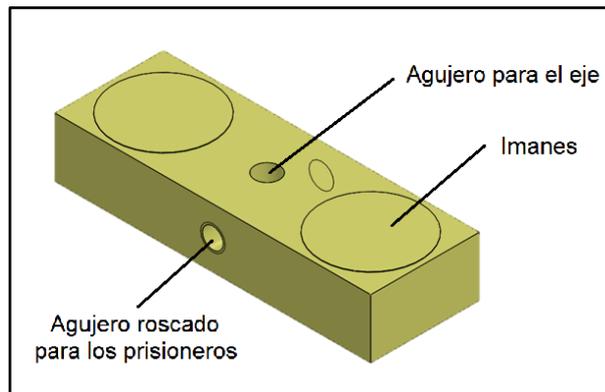


Figura 3.65. Porta-imaness

3.5.1.5. VISTA DE CONJUNTO

La Figura 3.66, muestra la simulación del equipo con los componentes electrónicos. Esta simulación se ha realizado previo a la fabricación del equipo, para verificar que cada elemento este correctamente ubicado y tenga el espacio necesario para su correcto funcionamiento.

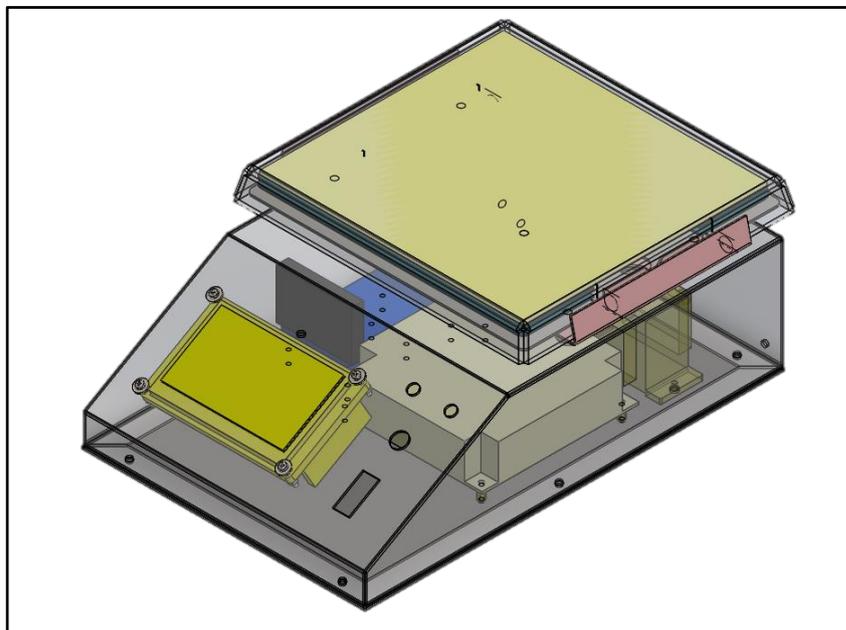


Figura 3.66. Simulación del equipo Hot-Plate y los elementos electrónicos

El ensamble de los componentes mecánicos diseñados, se muestran en la Figura 3.67. El detalle de cada componente se encuentra en el capítulo de anexos.

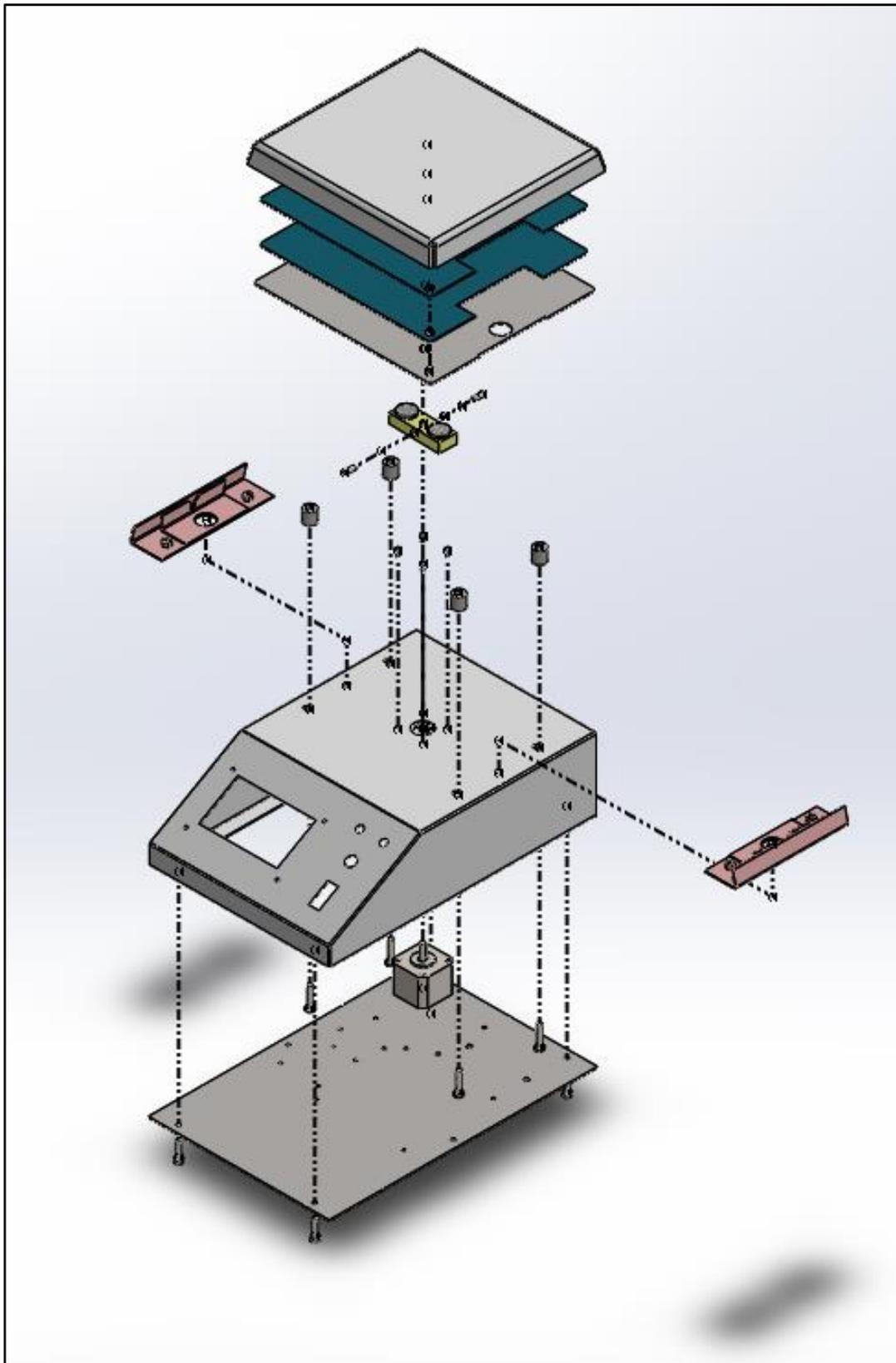


Figura 3.67. Vista explosionada del conjunto mecánico

3.5.2. ESPESOR DE CHAPA METÁLICA

El equipo no se someterá a esfuerzos de tracción y compresión, por esta razón, las únicas limitantes para la selección del espesor serán la resistencia a la soldadura, para que no se desintegre la chapa metálica y la resistencia a la temperatura de funcionamiento.

Se ha seleccionado dos espesores de chapa metálica, para la construcción de las piezas que conforman el equipo.

Para la estructura y para todas las demás partes metálicas, se ha seleccionado un espesor de chapa de 1.5 (mm), este espesor es suficiente para resistir el procesos de soldadura y de acabado superficial.

Para el plato térmico (Figura 3.68), se ha seleccionado un espesor de chapa metálica de 4 (mm). Este espesor, resistirá altas temperaturas y la dilatación térmica, no afectará el funcionamiento máximo del equipo.

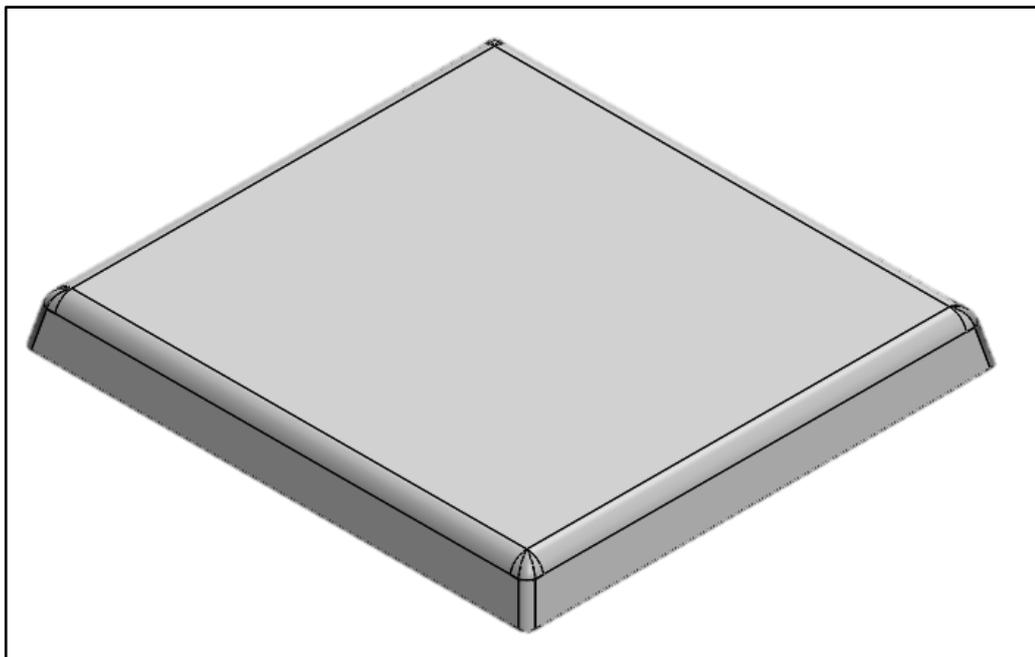


Figura 3.68. Plato Térmico

Según Jewett & Serway, la fórmula de dilatación lineal se expresa en la ecuación Ec. 3.23 (2009).

$$\Delta L = \alpha L_o(T_f - T_o) \quad \text{Ec. 3.23}$$

Donde:

“ ΔL ”, Diferencial de longitud (cm)

“ α ”, Coeficiente de dilatación térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

“ L_o ”, Longitud inicial (cm)

“ T_f ”, Temperatura final ($^{\circ}\text{C}$)

“ T_o ”, Temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$).

Según la tabla de características técnicas, el acero AISI304 tiene un coeficiente de dilatación térmica de 17.30×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) (Irestak Group, 2015).

Reemplazando las medidas respectivas $L_{\text{Largo}} = 22$ (cm), $L_{\text{Ancho}} = 23$ (cm) y $L_{\text{Espesor}} = 0.4$ (cm), en la ecuación Ec. 2.13, se obtiene la igualdad Ec. 3.24.

$$\Delta L_{\text{Largo}} = (17.30 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1})(22 \text{ cm})(431.22 \text{ } ^{\circ}\text{C} - 20 \text{ } ^{\circ}\text{C}) \quad \text{Ec. 3.24}$$

Las dilataciones térmicas en el plato térmico, en cada dirección, se muestran en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26.

Dilataciones Térmicas en el Plato Térmico

Especificación	Cantidad (cm)
ΔL_{Largo}	0.1565
ΔL_{Ancho}	0.1636
$\Delta L_{\text{Espesor}}$	0.0028

Como se puede observar en la Tabla 3.26, las dilataciones son despreciables cuando el equipo alcanza su máxima temperatura.

3.5.3. SISTEMA DE TRANSMISIÓN MAGNÉTICA

3.5.3.1. FUERZA DE SUJECIÓN MAGNÉTICA

En el desarrollo y funcionamiento del equipo, es sumamente importante la fuerza de sujeción que existe entre el sistema de rotación magnético y el agitador. La distancia de separación entre estos dos elementos es de 3 (cm).

Como se explicó en el literal 2.4.2, el campo magnético tiene dos polaridades. Dependiendo de su polaridad, los elementos se atraen o repelen.

Para analizar la fuerza de sujeción en el equipo Hot-Plate, se realizó pruebas experimentales, en donde intervienen el agitador magnético, el equipo y un dinamómetro.

En la Figura 3.69, se puede observar el experimento realizado para medir la fuerza de sujeción entre dos imanes, con el plato térmico entre ellos. El agitador magnético esta sostenido con un hilo al dinamómetro, por lo tanto, no existe ninguna pérdida que altere la medición de esta fuerza.



Figura 3.69. Experimento Fuerza de Sujeción

- En primer lugar, se encera el dinamómetro con el peso del agitador magnético (Figura 3.70).



Figura 3.70. Encerar al dinamómetro.

- Se procede a alejar el agitador magnético con el dinamómetro, para determinar la fuerza de sujeción
- Se repite el procedimiento tres veces para determinar la fuerza de sujeción
- Se anota los valores y se calcula un valor promedio, dando como resultado que el valor de la fuerza de sujeción en este experimento es de 0.18 (N)

En el capítulo 5, se desarrollará las pruebas necesarias de funcionamiento, en donde se detallará que la fuerza de sujeción de 0.18 (N), es suficiente para el proceso de agitación magnética en el equipo a diferentes velocidades.

CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA HOT-PLATE

4.1. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

Después de haber concluido con la fase de diseño del sistema Hot-Plate, se procede a la construcción e implementación de las partes que lo conforman. En esta sección se describen los procesos de manufactura para la elaboración de las partes mecánicas que consolidan el equipo y de las piezas diseñadas mediante el software CAD. Para ello, se usará diagramas de operación de procesos, que permiten detallar de una manera clara y concisa las operaciones que se han realizado.

4.1.1. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL EQUIPO

Las partes de la estructura del equipo, son fabricadas en un taller electro-mecánico, utilizando como principal material el acero inoxidable AISI304. A continuación, se detalla el diagrama de operación de procesos del plato térmico (Figura 4.1). Este diagrama se utilizará como ejemplo, para desarrollar los diagramas de procesos de las demás partes que conforman el equipo.

En la primera etapa del diagrama se cortar la plancha de acero inoxidable a medida, según el plano de taller y se prosigue con el trazo de la forma de la pieza sobre la plancha, en donde se especifica las líneas de dobléz.

En la primera inspección, se verifica que el trazado este acorde a las medidas especificadas en los planos referenciales.

Se procede a realizar el perforado y el doblado de la plancha, con la ayuda de diferentes máquinas y equipos, como por ejemplo una dobladora hidráulica. En la segunda inspección, se verifica que el doblado y la medida de los ángulos de dobleces sean los correspondientes.

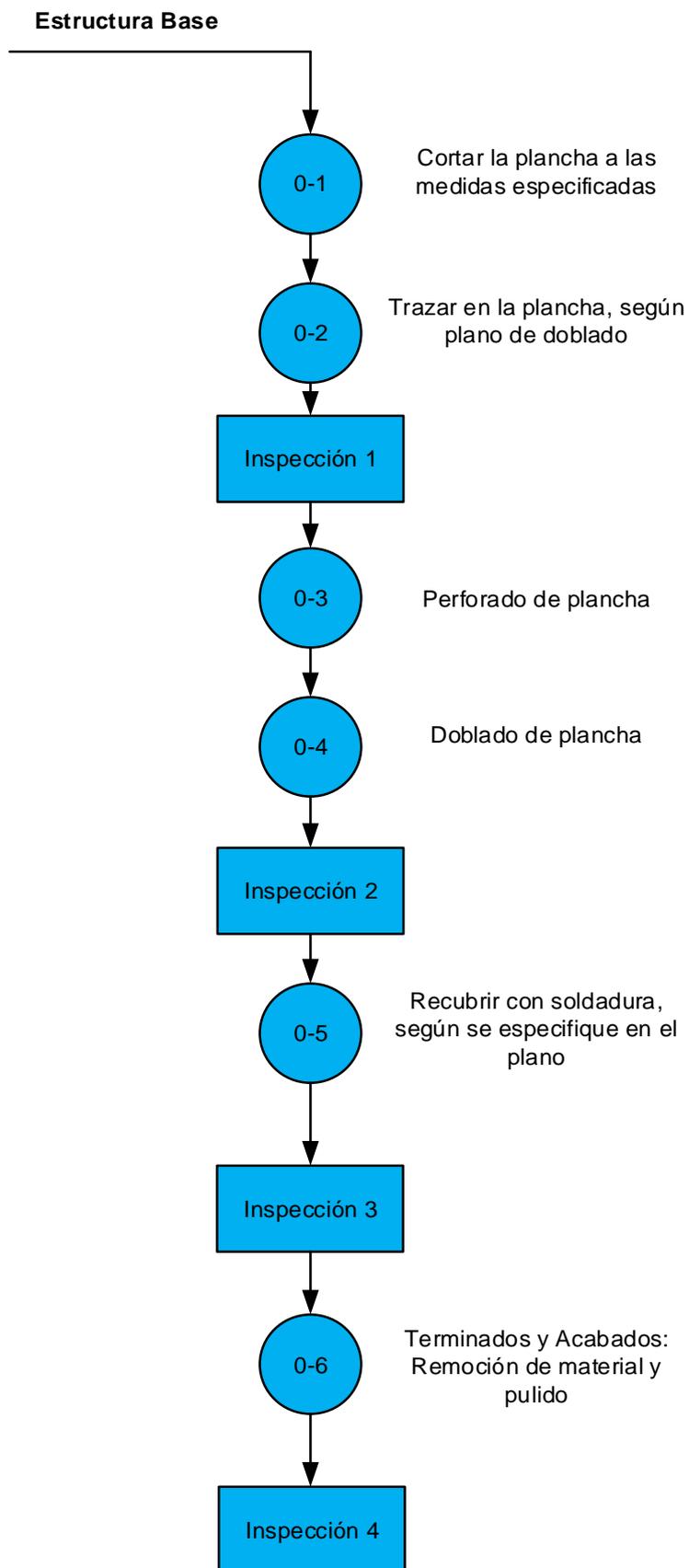


Figura 4.1. Diagrama de operación de procesos del Plato térmico

Para sellar algunas de las piezas del equipo, se realizará cordones de soldadura con proceso TIG. Estos cordones deben ser continuos y deben unir las dos partes que necesitan ser selladas. En la tercera inspección se verifica que la soldadura sea optima, uniforme y este dentro de los márgenes de calidad.

Finalmente, se procede a remover la escoria de la soldadura, limpiar y pulir los respectivos cordones de soldadura. En la cuarta inspección se verifica que la pieza tenga las medidas especificadas en los planos mecánicos, además que el terminado sea de calidad y acorde a la utilidad del equipo.

Los tiempos de elaboración de cada pieza que conforma el equipo se muestra en la Tabla 4.1. Estos datos se han obtenido siguiendo la misma metodología detallada en el diagrama de procesos para cada parte.

Tabla 4.1

Tiempos de construcción de las piezas del equipo

NOMBRE DE LA PIEZA	NÚMERO DE PIEZAS	TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN (horas)
PLATO TÉRMICO	1	10
ESTRUCTURA BASE	1	35
TAPA PRINCIPAL	1	10
TAPA TÉRMICA PRINCIPAL	2	10
TAPA DE PLATO	1	5
GANCHOS	2	10
ALZAS	4	2
TOTAL		82

4.1.2. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MAGNÉTICO DE MOVIMIENTO ROTACIONAL

Las piezas involucradas en este sistema están conformadas por los cuatro imanes de neodimio y del porta-imanés (Figura 3.65) fabricado en aluminio. Como se observar en la Figura 4.2, el porta-imanés tiene un agujero en el cual se coloca el eje del motor a pasos.

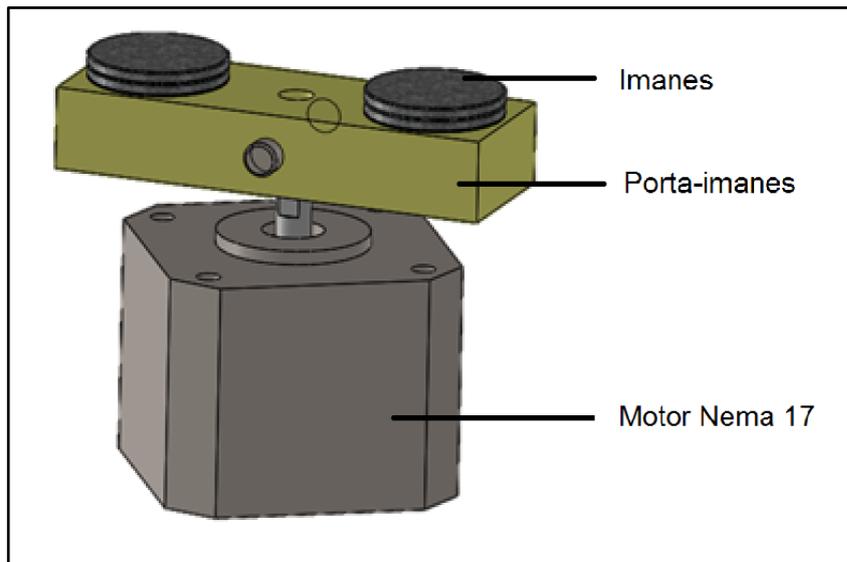


Figura 4.2. Ensamble motor y porta-imites

El sistema de sujeción entre el eje del motor y el porta-imites se ha diseñado mediante un prisionero, de esta manera la relación de movimiento será uno a uno.

4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

En esta sección se describen los procesos para la implementación de los sistemas eléctricos y electrónicos que conforman el equipo. Para lograr este fin, se han utilizado varias herramientas como software y aplicaciones, que permiten el funcionamiento lógico del equipo.

4.2.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MOTOR NEMA 17

El motor Nema 17, como se explicó en el literal 3.2.1, es un motor a pasos, que requiere de un sistema embebido para su funcionamiento.

Para su implementación es necesario ajustar el motor Nema 17 a la estructura base mediante tornillos de sujeción, como se indica en la Figura 4.3.

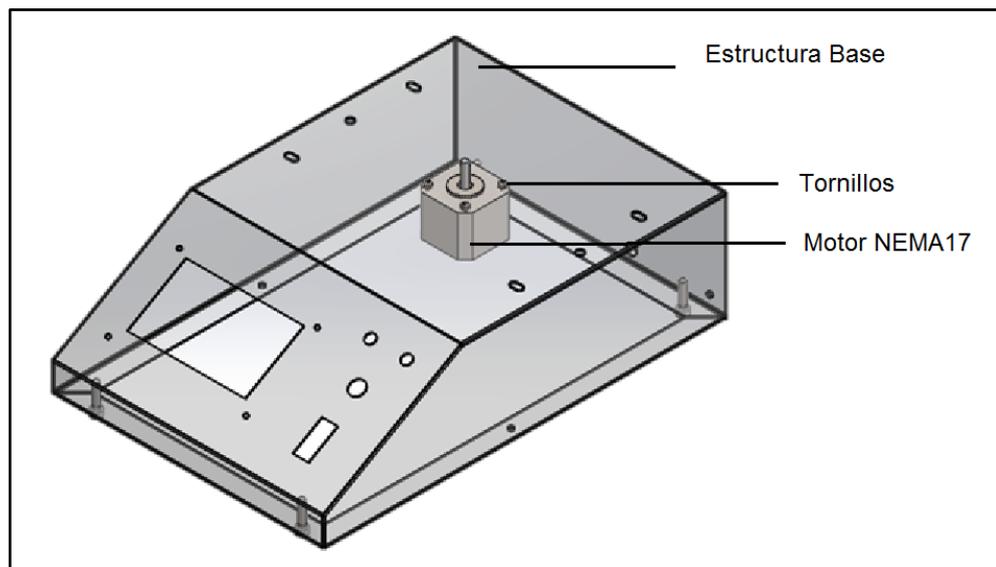


Figura 4.3. Implementación del motor Nema 17.

Para eliminar cualquier tipo de vibración entre el motor y la estructura base, se ha ubicado aislantes de vibración (cauchos) en la parte inferior del equipo.

4.2.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA RESISTENCIA PLANA

El sistema de la resistencia plana se encarga de generar y transmitir energía térmica, con la ayuda del plato térmico. Por esta razón, es necesario aislar el calor generado, de manera que no se pierda por la inferior del equipo. Para este fin, se han utilizado láminas de fibra de vidrio y de acero inoxidable.

El diseño del plato térmico incluye un sistema de cuatro alzas (Figura 4.4), que colaboran a la disminución de la transferencia térmica hacia el interior del equipo. Estas alzas han sido fabricadas de un eje de acero inoxidable, para que no exista oxidación debido a las altas temperaturas que soportará el equipo esté en funcionamiento.

Además, las alzas contribuyen con la función de separar los elementos aislantes y el conjunto de transmisión de movimiento rotatorio acoplado al motor Nema 17 (Figura 4.2).

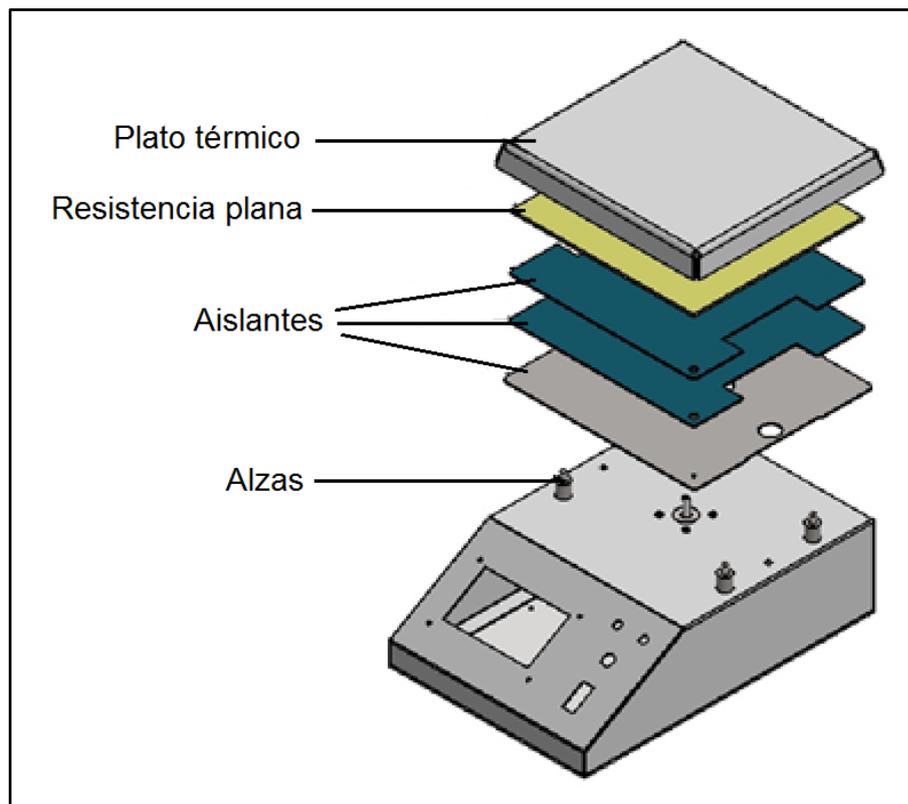


Figura 4.4. Implementación de la resistencia plana

La resistencia plana será conectada a la placa de potencia, para ser controlada mediante el Arduino Master y el circuito de conmutación AC.

4.2.3.IMPLEMENTACIÓN DE LA PANTALLA TÁCTIL Y ELEMENTOS ELECTRÓNICOS

Para interactuar con el equipo Hot-Plate, se va a utilizar una pantalla TFT de 4.3 pulgadas. Esta pantalla es táctil, permitirá el ingreso de los datos requeridos por el equipo para su funcionamiento, y permitirá monitorear en tiempo real, las variables que se van a controlar mediante una interfaz HMI amigable y de fácil entendimiento para el usuario.

La pantalla TFT, estará ubicada en la parte frontal del equipo, sujeta mediante cuatro pernos y tuercas, y protegida contra el derrame de líquidos, mediante una lámina plástica adherida a la estructura base.

En la parte frontal del equipo también se encuentran ubicados los botones de encendido y emergencia, además de dos leds indicadores (Figura 4.5). El primer led indicador muestra el estado de funcionamiento del equipo (encendido o apagado). El segundo led, indica el tipo de operación que está ejecutando el equipo.

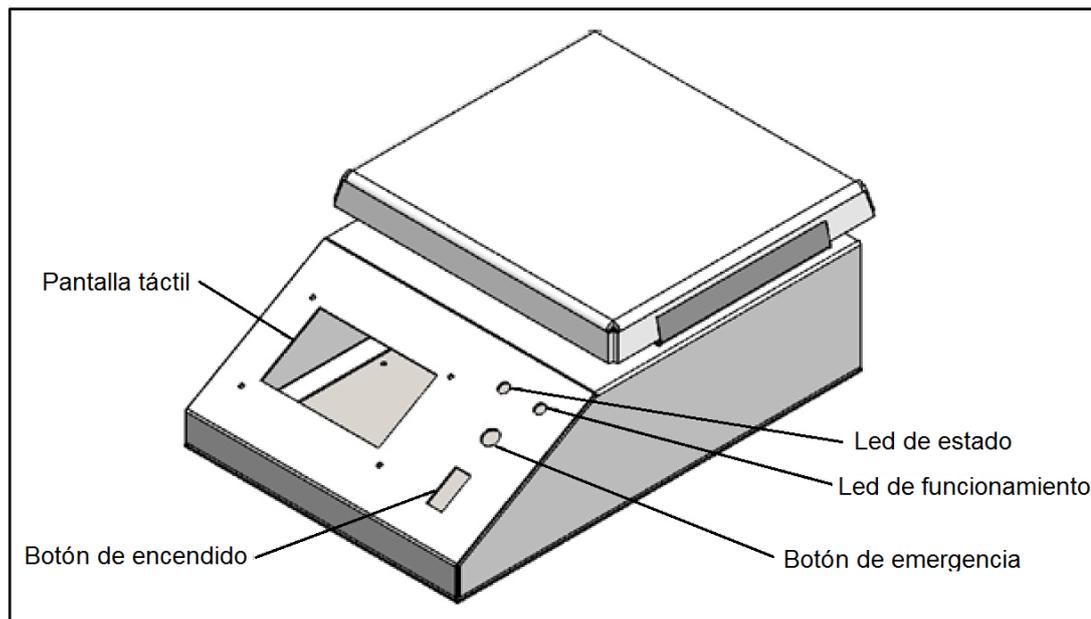


Figura 4.5. Implementación de la pantalla táctil y elementos electrónicos

Estos elementos, son ubicados en el equipo y conectados a la placa de control. A través de un bus de datos, la placa de control comunica la información al arduino *master*, que se encarga de controlar el funcionamiento de la pantalla táctil, los leds indicadores y de la lectura del estado del botón de emergencia.

El botón de encendido cumple la función de energizar o abrir el circuito que alimenta a todos los componentes; el botón de emergencia, es un pulsador autoenclavante, que restringe y limita el funcionamiento del equipo. Si el botón de emergencia se encuentra activado, desactiva todos los actuadores y emite tres diferentes alertas: una alarma sonora, una alarma lumínica y un mensaje para el usuario en la pantalla.

Los leds muestran de forma visual el estado del equipo, el led de funcionamiento es el encargado de indicar si el equipo esta encendido o apagado; y el led de operación indica mediante varios colores, los actuadores que se encuentran en funcionamiento. En la Tabla 4.2, se resumen la correspondencia entre los sistemas en funcionamiento y los colores que adopta el led de operación.

Tabla 4.2.

Colores del led de acuerdo a la operación del equipo

Operación	Color	
Equipo encendido, sin ejecución	Blanco	□
Control de temperatura del plato	Amarillo	■
Control de temperatura del fluido	Azul	■
Control de agitación	Cian	■
Control de agitación y temperatura del plato	Verde	■
Control de agitación y temperatura del fluido	Magenta	■

En la Figura 4.6, se muestra al equipo con la pantalla táctil y sus componentes electrónicos que permiten su funcionamiento.

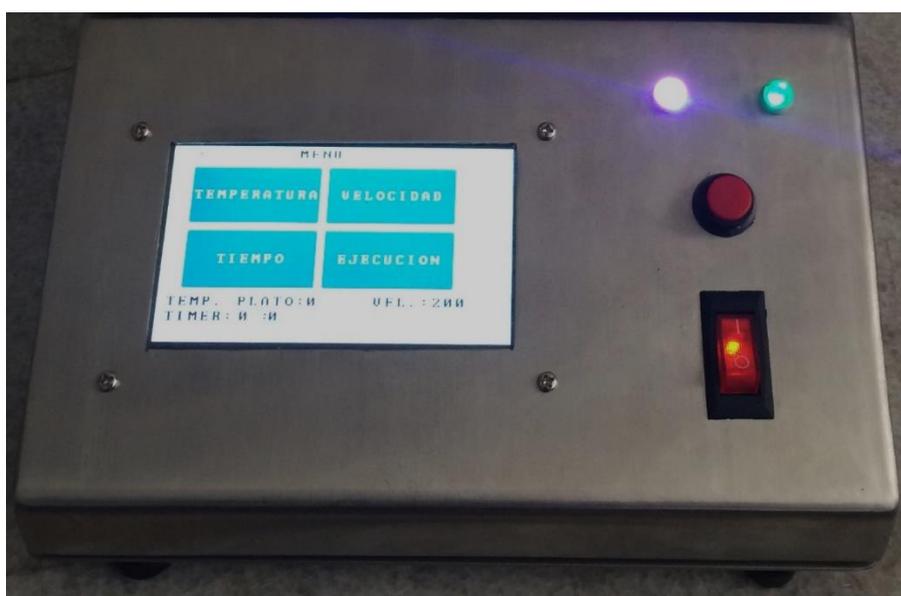


Figura 4.6. Panel frontal de control del equipo Hot-Plate

4.2.4. PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO

En la Figura 4.7, se muestra el diagrama que resume la forma en la que se ha programado la interfaz de usuario para el funcionamiento del equipo, además del detalle de las pantallas que componen esta interfaz.

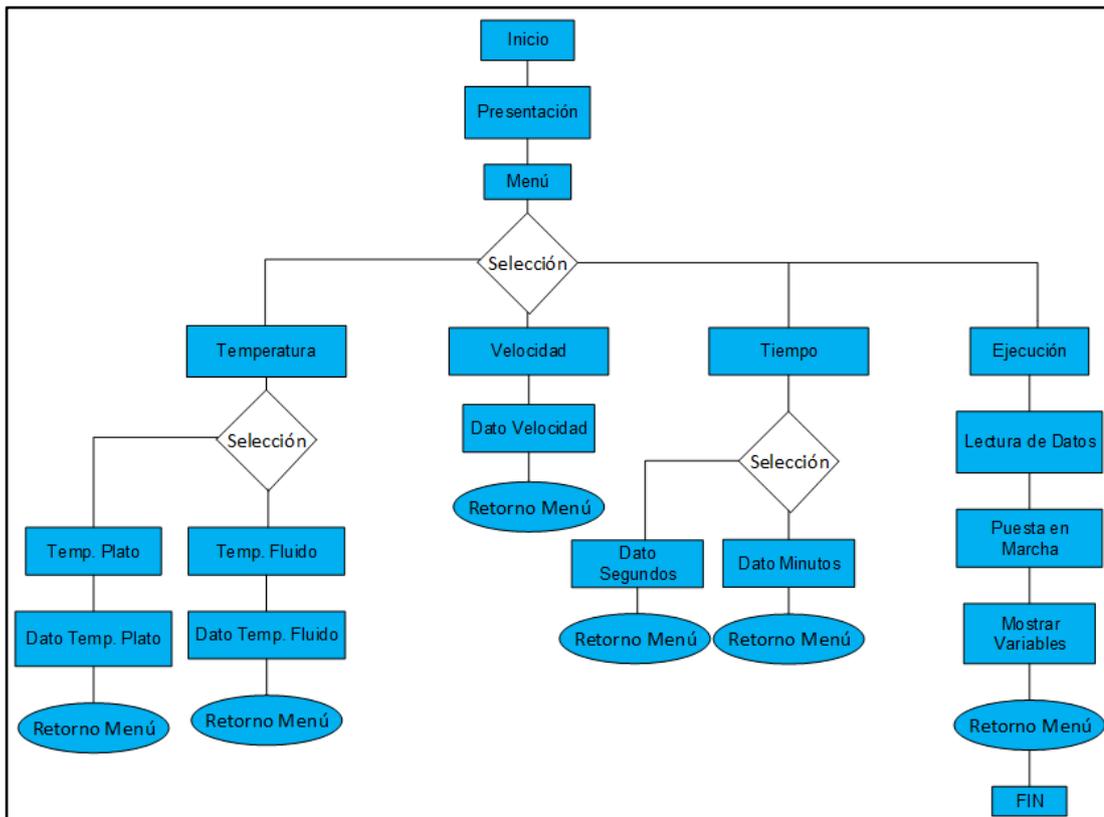


Figura 4.7. Diagrama de programación de la Interfaz de usuario

Para la programación del menú de usuario, se han utilizado librerías de la pantalla TFT, como se indica en la Figura 4.8.

```

GENERAL_MEGA_todo_acumulador | Arduino 1.0.5-r2
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda
GENERAL_MEGA_todo_acumulador
#include <UTFT.h>
#include <UTouch.h>
#include <UTFT_Buttons.h>
  
```

Figura 4.8. Librerías para la pantalla TFT

Estas librerías permiten la utilización de las funciones de la pantalla TFT. Además, se debe colocar el modelo de la pantalla y el tipo de *shield* que se ha utilizado (Figura 4.9), de esta manera el microcontrolador podrá utilizar la interfaz para mostrar y leer los datos que el sistema requiere.

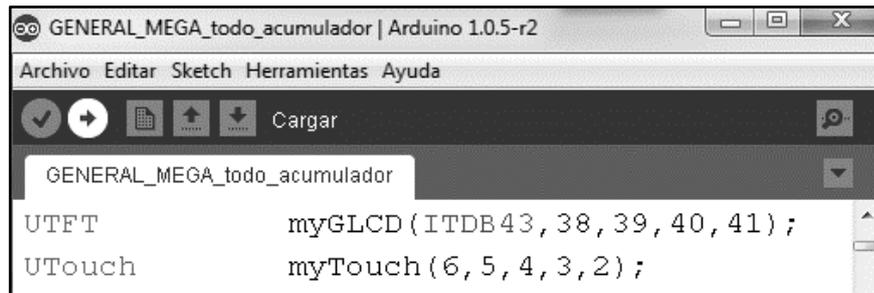


Figura 4.9. Datos de la pantalla y el *shield*

En la inicialización de las variables, se colocan los códigos correspondientes que definen el color del fondo de pantalla, el tamaño de la fuente de la letra, el color de la letra, entre otros. Estas líneas de código se muestran en la Figura 4.10.

```

void setup()
{
  myGLCD.InitLCD();
  myGLCD.clrScr();
  myGLCD.setFont(BigFont);
  myTouch.InitTouch();
  myTouch.setPrecision(PREC_MEDIUM);
  myButtons.setTextFont(BigFont);
  myGLCD.fillScr(255,255,255);
  myGLCD.setColor(VGA_BLACK); //COLOR DE LAS LETRAS
  myGLCD.setBackColor(VGA_WHITE); //COLOR DEL FONDO
}
  
```

Figura 4.10. Inicialización de variables

Se prosigue a programar cada pantalla que conforma el menú principal de la pantalla principal del equipo. Como ejemplo de la programación, se presenta el código que define a la primera pantalla. En esta pantalla se encuentra programada la presentación del equipo (Figura 4.11).

```

//PANTALLA PRESENTACION
myGLCD.fillRect(255,255,255); //0 0 0
myGLCD.setColor(0, 0, 255);
myGLCD.drawRoundRect(6,3,470,259);
myGLCD.drawRoundRect(7,4,469,258);
myGLCD.setColor(0, 0, 0); //COLOR DE LOS NUMEROS
myGLCD.print("\UNIVERSIDAD DE LAS", CENTER, 10);
myGLCD.print("FUERZAS ARMADAS-ESPE\"", CENTER, 42);
myGLCD.print("INGENIERIA MECATRONICA", CENTER, 74);
myGLCD.print("FUZZY HOT-PLATE", CENTER, 106);
myGLCD.print("DIEGO FERNANDO NAUNAY PUENTE", CENTER, 138);
myGLCD.print("HENRY DAVID LOACHAMIN IZA", CENTER, 170);
myGLCD.print("SANGOLQUI-ECUADOR", CENTER, 202);
myGLCD.print("2015", CENTER, 234);
delay(5000);

```

Figura 4.11. Ejemplo de programación de una pantalla: pantalla de presentación

Con este grupo de instrucciones, se genera la pantalla que se muestra en la Figura 4.12.



Figura 4.12. Pantalla de presentación

La variable denominada "menuc", es la encargada de llamar a las diferentes interfaces que conforman el menú principal del equipo, dependiendo del valor que adopte. Esta variable permite la interacción entre el menú principal, con las demás interfaces, que permiten mostrar y leer datos para el funcionamiento del equipo. En la Figura 4.13, se muestra el programa principal y los valores que puede adoptar la variable "menuc".

```

void loop(){
  while(1) {
    if (menuc==1)
    {menu();    }
    if (menuc==2)
    {temperatura();}
    if (menuc==3)
    {velocidad();}
    if (menuc==4)
    {tiempo();}
    if (menuc==5)
    {ejecucion();}
    if (menuc==6)
    {temperatura_liquido(); }
    if (menuc==7)
    {temperatura_plato(); }
  }
}

```

Figura 4.13. Programa principal

La programación es similar para el resto de interfaces que permiten el ingreso de datos, muestran las diferentes variables y que conforman el menú principal, debido a que la estructura de programación es la misma. En la Figura 4.14, se muestra la pantalla del menú principal. En esta interfaz se encuentran las siguientes opciones: TEMPERATURA, VELOCIDAD, TIEMPO y EJECUCIÓN. Además, esta pantalla de usuario, también muestra las variables de entrada del sistema con el valor que se ha ingresado: TEMP. FLUIDO ó TEMP. PLATO (según corresponda), VEL. y TEMPORIZADOR.

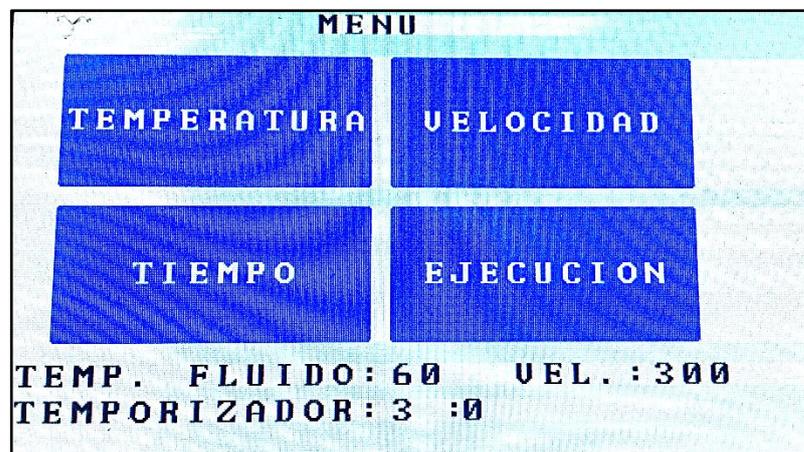


Figura 4.14. Interfaz del menú principal

Las líneas de código que se muestran en la Figura 4.15, pertenecen a la programación de la pantalla principal. En estas líneas de programa, se puede analizar las siguientes instrucciones: “myGLCD.fillSCR”, que ayuda a limpiar la pantalla, “myGLCD.setColor” que modifica el color de los caracteres que tendrá la interfaz.

```
void menu(){
  myGLCD.fillScr(255,255,255); //0 0 0
  int butmenu1, butmenu2, butmenu3, butmenu4,pressed_button;
  myGLCD.setColor(0, 0, 0); //COLOR DE LOS NUMEROS
  myGLCD.print("MENU", 175, 3);
  if (temp_liquido>0){
    myGLCD.print("TEMP. FLUIDO:", 10, 210); //VARIABLE ACTUAL MENU
    myGLCD.printNumI(temp_liquido, 220, 210);
  }
  else {
    myGLCD.print("TEMP. PLATO:", 10, 210); //VARIABLE ACTUAL MENU
    myGLCD.printNumI(temp_plato, 200, 210);
  }
  myGLCD.print("VEL.:", 290, 210); //VARIABLE ACTUAL MENU
  myGLCD.printNumI(vel, 370, 210);
  myGLCD.print("TEMPORIZADOR:", 10, 230); //VARIABLE ACTUAL MENU
  myGLCD.printNumI(mint, 220, 230);
  myGLCD.print(":", 250, 230);
  myGLCD.printNumI(seg, 260, 230);
}
```

Figura 4.15. Programación pantalla de menú (primera parte)

En la siguiente parte de la programación de esta interfaz (Figura 4.16), se realiza la creación de cada botón con sus respectivas coordenadas de ubicación en la pantalla. Además se ha utilizado el comando “myButtons.drawButtons()”, encargado de dibujar la forma de los botones que se presentan en la pantalla. En la parte inferior de la Figura 4.16, se inicializan algunas variables que son utilizadas por el programa (banderas de comunicación y la variable que controla la alarma auditiva).

```
butmenu1 = myButtons.addButton( 30, 30, 180, 80, "TEMPERATURA");
butmenu2 = myButtons.addButton( 220, 30, 180, 80, "VELOCIDAD");
butmenu3 = myButtons.addButton( 30, 120, 180, 80, "TIEMPO");
butmenu4 = myButtons.addButton( 220, 120, 180, 80, "EJECUCION");
myButtons.drawButtons();
menuc=1;
digitalWrite(BanderaS, LOW); //Banderas Inicializacion
digitalWrite(BanderaM, LOW); //Banderas Inicializacion
digitalWrite(buzzer, LOW); //Inicializacion Buzzer
```

Figura 4.16. Programación pantalla de menú (segunda parte)

Finalmente, en la Figura 4.17, se muestra un código de ciclo infinito, y en su interior existen varias interrupciones, que permiten ir a los subprogramas. En estas líneas de código, se espera la lectura de la activación de cada botón, utilizando diferentes instrucciones, como la modificación de la variable “menuc”, y la sentencia que permite salir del ciclo repetitivo.

```

while(1){
  if (myTouch.dataAvailable() == true)
  {pressed_button = myButtons.checkButtons();
  if (pressed_button==butmenu1)
  {myButtons.deleteAllButtons();
  Banderatemp=0;
  menuc=2;
  break; }
  if (pressed_button==butmenu2)
  {myButtons.deleteAllButtons();
  menuc=3;
  break; }
  if (pressed_button==butmenu3)
  {myButtons.deleteAllButtons();
  menuc=4;
  break; }
  if (pressed_button==butmenu4) //EJECUCION
  {myButtons.deleteAllButtons();
  menuc=5;
  break; }}}

```

Figura 4.17. Programación pantalla de menú (tercera parte)

A continuación, se mostrará y explicará cada una de las pantallas que conforman la interfaz de usuario del equipo Hot-Plate:

- Pantalla de Temperatura (Figura 4.18): en esta pantalla existen dos opciones para el control de temperatura por el usuario. La primera opción, permite el control de temperatura en el plato, mientras que la segunda opción, controla la temperatura que tiene el fluido, mediante la sonda del equipo (sensor RTD). Es importante mencionar, que la opción “menú” se encuentra presente en todas las pantallas y permite el regreso de la pantalla a la interfaz del menú principal (Figura 4.14).



Figura 4.18. Pantalla de Temperatura

- Pantalla de Temperatura en el Fluido (Figura 4.19): en esta pantalla se puede ingresar el *set point* de la temperatura que se desea obtener en el fluido, en un rango comprendido entre 60 a 100 (°C). En esta pantalla, existe la posibilidad de borrar o aceptar los datos ingresados, y la opción de regresar al menú principal.

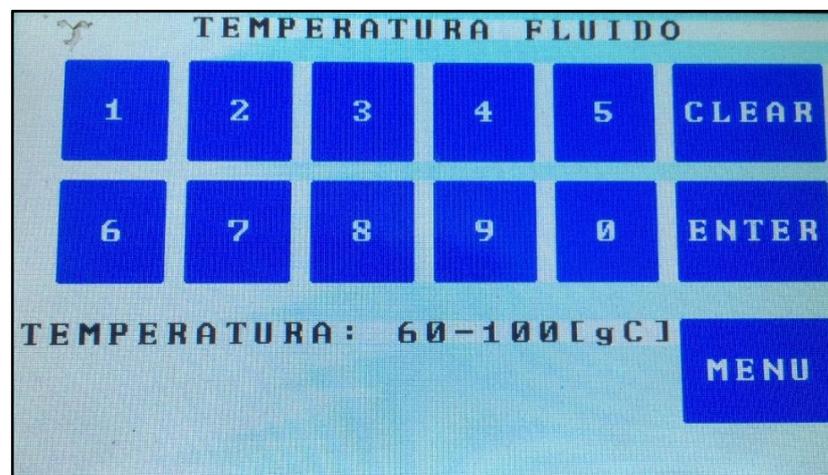


Figura 4.19. Pantalla de temperatura de fluido

- Pantalla de Temperatura en el Plato (Figura 4.20): en esta pantalla se puede ingresar el *set point* de temperatura que se desea obtener en el plato térmico, en un rango de 200 a 320 (°C). En esta pantalla, existe la posibilidad de borrar o aceptar los datos ingresados, y la opción de regresar al menú principal.



Figura 4.20. Pantalla de temperatura plato

- Pantalla de Velocidad (Figura 4.21): en esta pantalla se ingresa la velocidad de rotación que se requiere para la agitación en la sustancia, entre un rango de 10 a 360 (RPM). En esta pantalla, existe la posibilidad de borrar o aceptar los datos ingresados, y la opción de regresar al menú principal.

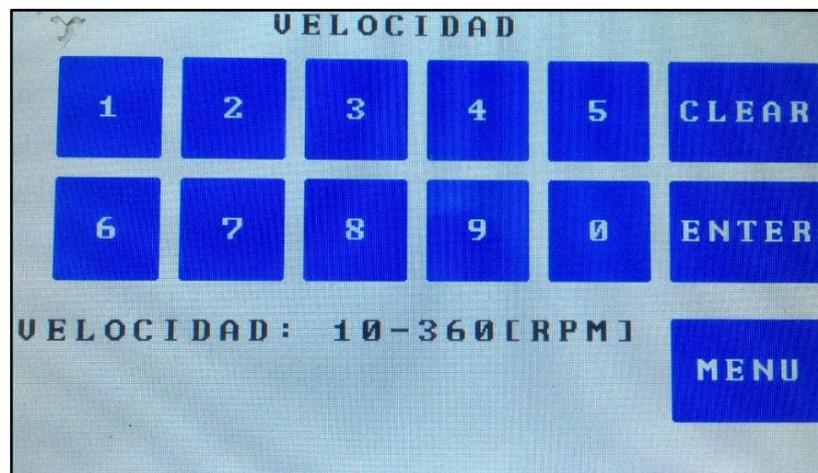


Figura 4.21. Pantalla de velocidad

- Pantalla de Temporizador (Figura 4.22): en esta pantalla son ingresados los datos del tiempo (minutos y segundos) en el que, el equipo se encontrará en funcionamiento normal, y al culminar este tiempo, se activará una alarma auditiva. En esta pantalla, existe la posibilidad de borrar o aceptar los datos ingresados, y la opción de regresar al menú principal.

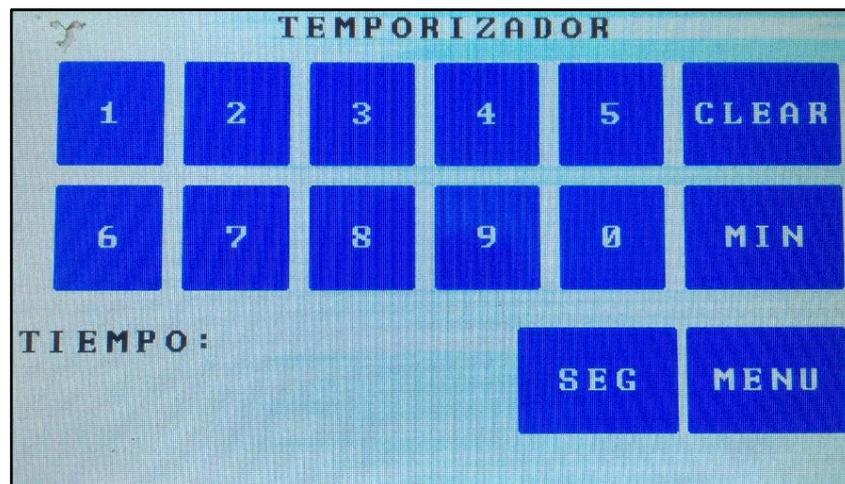


Figura 4.22. Pantalla de temporizador

- Pantalla de Ejecución (Figura 4.23): al ingresar en la pantalla de ejecución, se activarán los actuadores necesarios para lograr que las variables ingresadas lleguen a los valores dispuestos por el usuario. Esta pantalla muestra en tiempo real las respectivas variables como: TEMP. FLUIDO, TEMP. PLATO, VEL MOTOR, TEMP REQ. FLUIDO ó TEMP. REP. PLATO y TIEMPO. De igual forma que en el resto de pantallas, existe la posibilidad de regresar al menú principal.

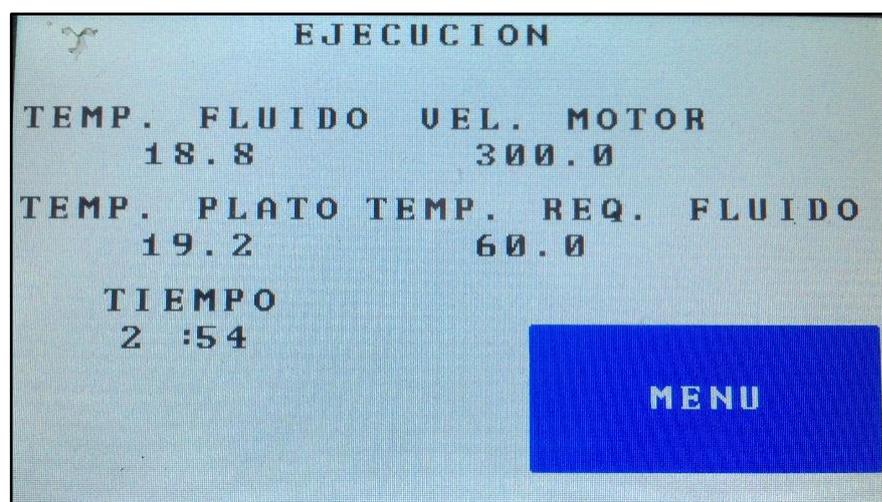


Figura 4.23. Pantalla de ejecución

Cuando el botón de emergencia es activado, la pantalla de ejecución presenta un mensaje visual de alarma, como se indica en la Figura 4.24.

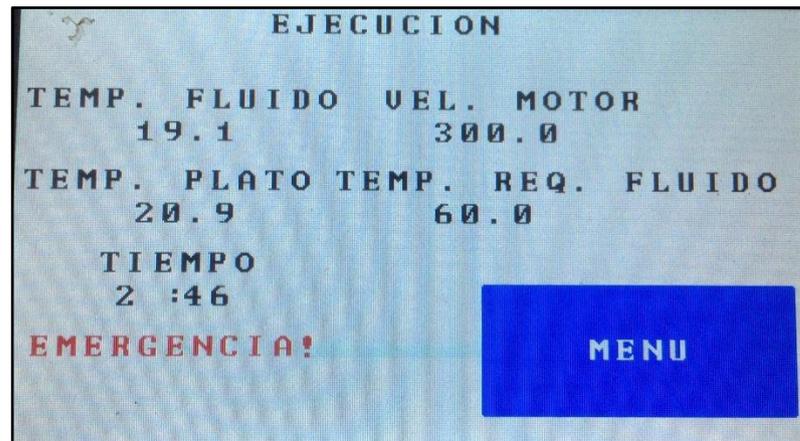


Figura 4.24. Pantalla de ejecución en emergencia

4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO

4.3.1. IMPLEMENTACIÓN Y LECTURA DE LOS SENSORES

El microcontrolador *master* se encarga de la lectura de los datos que entregan los sensores. En la Figura 4.25, se muestra la inicialización de las variables que se utilizarán para la lectura y procesamiento de la información generada por los sensores.

```
//PT100-TIPOK
float INPUT_PT100 = A0; |
float RES_PT100;
float TEMP_PT100;
float GAIN=1+49.4/0.476;
float R1=8200;
float R2=100;

//TERMOCUPLAK
float INPUT_K = A1;
float ANALOG_K;
float VOLTAGE_K;
float TEMP_F;

//mostrar promedio
float promPT100=0;
float promK=0;
```

Figura 4.25. Inicialización de variables para la lectura de los sensores

Para la termocupla tipo K, como se indicó en el literal 3.4.1.1, el integrado conectado al sensor, entrega una señal de 10 (mV) por cada grado centígrado al microcontrolador, iniciando con 0 (mV) correspondiente a una temperatura de 0 (°C).

Para leer la señal del RTD, se debe utilizar la expresión de la ecuación Ec. 3.18. En donde la variable que se desea encontrar es el valor de la resistencia de sensor PT100.

Para ambas señales, se maneja un voltaje de 4.9 (V), con una resolución de 1024 (bits). En la Figura 4.26, se muestra las líneas de código que permiten el acondicionamiento y la transducción de la señal producida por cada sensor.

```

void loop() {
  //PT100
  RES_PT100= analogRead(INPUT_PT100);
  RES_PT100=RES_PT100*4.9/1023;
  RES_PT100=(RES_PT100*(R1+R2)*(R1+R2)/(5*GAIN*R1-RES_PT100*(R2+R1))+R2);
  TEMP_PT100=((RES_PT100/100)-1)/0.003850;
  acumuladorPT100=acumuladorPT100+TEMP_PT100;

  //TERMOCUPLA K
  ANALOG_K= analogRead(INPUT_K);
  VOLTAGE_K=ANALOG_K*4.9*100/1023;
  TEMP_F=VOLTAGE_K;
  acumuladorK=acumuladorK+TEMP_F;

  if(cont==9){
    promPT100=acumuladorPT100/9;
    promK=acumuladorK/9;
  }

  cont=cont+1;

  if (cont>9){
    cont=1;
    acumuladorPT100=0;
    acumuladorK=0;
  }

  myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
  myGLCD.print("TEMP. FLUIDO",3, 50);
  myGLCD.printNumF(promPT100,1, 70, 70);

  myGLCD.print("TEMP. PLATO",3, 100);
  myGLCD.printNumF(promK,1, 70, 120);
}

```

Figura 4.26. Código de acondicionamiento para los sensores

En las líneas de código indicadas en la Figura 4.26, se puede observar la implementación de una variable acumuladora para cada sensor. Esta implementación permite mostrar un valor promedio para cada sensor después de nueve lecturas, de esta manera se previene saltos bruscos en la lectura de los datos y que la histéresis de cada sensor no afecte al control.

4.3.2. PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DIFUSO

Para implementar el sistema de control difuso, se ha utilizado la librería eFLL para arduino. Esta librería es un desarrollo de software libre, que permite controlar diferentes sistemas a partir de la lógica difusa (Alves, 2012).

A continuación, se explicará la programación que se ha desarrollado para el control de temperatura en el plato. Los otros dos controladores difusos se implementarán con la misma lógica.

Se debe inicializar en el código las bibliotecas que la librería eFLL utiliza. Después se inicializa un nuevo objeto difuso encargado de contener las funciones de membresía de entrada y de salida. En la Figura 4.27, se muestra la inicialización del controlador difuso en arduino.

```
//Inicialización de las librerías fuzzy
#include <FuzzyRule.h>
#include <FuzzyComposition.h>
#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzySet.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>

//Inicialización de un nuevo objeto fuzzy
Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();
```

Figura 4.27. Inicialización del controlador difuso en arduino

En el espacio destinado a la inicialización de las variables en el código, se crea una nueva entrada para el controlador difuso (errorP). También se crea cada función de membresía del conjunto de entrada diseñado en literal 3.3.1.1 y se agrega cada función al conjunto de entrada del controlador en arduino, como se muestra en la Figura 4.28.

```
//Creación de la entrada fuzzy error
FuzzyInput* errorP = new FuzzyInput(1);

//Creación de las funciones de membresía de entrada
FuzzySet* EP_MP = new FuzzySet(-0.5,-0.5,0,0.55);
errorP->addFuzzySet(EP_MP);
FuzzySet* EP_P = new FuzzySet(0.2,0.55,0.55,0.9);
errorP->addFuzzySet(EP_P);
FuzzySet* EP_MB = new FuzzySet(0.55,0.9,0.9,1.25);
errorP->addFuzzySet(EP_MB);
FuzzySet* EP_M = new FuzzySet(0.9,1.25,1.25,1.6);
errorP->addFuzzySet(EP_M);
FuzzySet* EP_MA = new FuzzySet(1.25,1.6,1.6,1.95);
errorP->addFuzzySet(EP_MA);
FuzzySet* EP_G = new FuzzySet(1.6,1.95,1.95,2.3);
errorP->addFuzzySet(EP_G);
FuzzySet* EP_MG = new FuzzySet(1.95,2.5,3.5,3.5);
errorP->addFuzzySet(EP_MG);

fuzzy->addFuzzyInput(errorP);
```

Figura 4.28. Programación de las funciones de membresía de entrada

De igual forma, se crea una nueva salida para el controlador difuso (pPwmP), y se añade a esta salida cada función de membresía del conjunto difuso de salida (Figura 4.29).

```
//Creación de la salida fuzzy retardo
FuzzyOutput* pPwmP = new FuzzyOutput(1);

//Creación de las funciones de membresía de salida
FuzzySet* PwmP_MP = new FuzzySet(-10,-10,0,20);
pPwmP->addFuzzySet(PwmP_MP);
FuzzySet* PwmP_P = new FuzzySet(5,20,20,35);
pPwmP->addFuzzySet(PwmP_P);
FuzzySet* PwmP_MB = new FuzzySet(20,35,35,50);
pPwmP->addFuzzySet(PwmP_MB);
FuzzySet* PwmP_M = new FuzzySet(35,50,50,65);
pPwmP->addFuzzySet(PwmP_M);
FuzzySet* PwmP_MA = new FuzzySet(50,65,65,80);
pPwmP->addFuzzySet(PwmP_MA);
FuzzySet* PwmP_G = new FuzzySet(65,80,80,95);
pPwmP->addFuzzySet(PwmP_G);
FuzzySet* PwmP_MG = new FuzzySet(80,100,120,120);
pPwmP->addFuzzySet(PwmP_MG);

fuzzy->addFuzzyOutput(pPwmP);
```

Figura 4.29. Programación de las funciones de membresía de salida

Posteriormente, se programa cada regla difusa resumida en la Tabla 3.6, que relaciona las entradas con las salidas del controlador. En la Figura 4.30, se muestra la programación de las dos primeras reglas difusas en arduino.

```
//Ensamble de las reglas difusas

//Regla: "SI errorP = E_MP ENTONCES pPwmP = PwmP_MP"
FuzzyRuleAntecedent* siEP_MP = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siEP_MP->joinSingle(EP_MP); // Se añade la función de membresía al antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesP_PwmP_MP = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a expresión
entoncesP_PwmP_MP->addOutput(PwmP_MP); // Se añade la función de membresía a la consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla01 = new FuzzyRule(1, siEP_MP, entoncesP_PwmP_MP); // Etiqueta
fuzzy->addFuzzyRule(regla01); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI errorP = E_P ENTONCES pPwmP = PwmP_P"
FuzzyRuleAntecedent* siEP_P = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siEP_P->joinSingle(EP_P); // Se añade la función de membresía al antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesP_PwmP_P = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a expresión
entoncesP_PwmP_P->addOutput(PwmP_P); // Se añade la función de membresía a la consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla02 = new FuzzyRule(2, siEP_P, entoncesP_PwmP_P); // Etiqueta
fuzzy->addFuzzyRule(regla02); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso
```

Figura 4.30. Programación de las reglas difusas

Finalmente, se utiliza las líneas de código en el programa principal, mostradas en la Figura 4.31, para la fusificación y defusificación de los valores que se utilizan en el control.

```
fuzzy->setInput(1, ePlato);
fuzzy->fuzzify();
pPwmPlato=fuzzy->defuzzify(1);
```

Figura 4.31. Proceso de fusificación y defusificación en arduino

4.3.3. LIMITACIÓN DE LA POTENCIA PARA EL CONTROL

Existirán varios rangos en los que el *set point*, no requiera que el equipo llegue a su máxima potencia, pues esto originaría picos muy grandes en el control y provocaría un desperdicio energético considerable.

Por esta razón, se ha relacionado el *set point* que el usuario ingresa en el control del plato o del fluido, con potencias máximas de funcionamiento, que serían equivalentes al cien por ciento de la potencia que utilizará el control.

4.3.3.1. RANGOS DE POTENCIA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN EL PLATO

El control en el plato, tiene la característica de ser una planta que responde con mayor rapidez al control y que permite temperaturas altas para la preparación de sustancias en el laboratorio.

Por esta razón, se ha utilizado potencias altas para alcanzar estas temperaturas elevadas. El control funcionará con los valores máximos de potencia que equivaldrían al cien por ciento del control. Esta implementación adicional al controlador permite ahorrar energía eléctrica, controlar de mejor forma y con mayor rapidez la planta térmica del plato.

En la Tabla 4.3, se resume los valores máximos de potencia restringida por el valor máximo de PWM, para cada rango que adopte el *set point* de temperatura en el plato.

Tabla 4.3

Valores máximos de potencia PWM para los rangos de temperatura en el plato

Rango de Temperatura	PWM máximo
[180 210)	100
[210 240)	125
[240 270)	150
[270 300)	175
[300 320]	200

4.3.3.2. RANGOS DE POTENCIA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN EL FLUIDO

El control en el fluido, es una planta con respuesta más lenta al control y alcanza temperaturas bajas en el fluido.

Por esta razón, se han utilizado potencias menores para poder controlarlo, a pesar de que el sistema se vuelva más lento.

En la Tabla 4.4, se resume los valores máximos de potencia PWM, para cada rango que adopte el *set point* de temperatura del fluido.

Tabla 4.4

Valores máximos de potencia PWM para los rangos de temperatura en el fluido

Rango de Temperatura	PWM máximo
[60 70)	40
[70 80)	55
[80 90)	70
[90 100)	150

4.4. COMUNICACIÓN ENTRE EL ARDUINO MAESTRO Y EL ARDUINO ESCLAVO

Se ha utilizado la comunicación I²C para enlazar a los dos microcontroladores:

- El maestro, encargado de la lectura de datos, visualización de las variables y del control del sistema de potencia
- El esclavo, encargado del control del motor Nema 17

En la implementación del sistema embebido, fue necesario utilizar banderas adicionales para que la comunicación funcione correctamente, debido a que cualquier retardo presente en el sistema que controla al motor Nema 17, provoca mal funcionamiento del sistema rotatorio.

Estas banderas permiten que se ejecute diferentes secuencias en el arduino esclavo, separando una función de otra, por ejemplo, en el momento de la transmisión del dato de velocidad desde el arduino maestro, entra a un subprograma de lectura y al momento de ejecución, entra a un subprograma de código repetitivo que controla únicamente la ejecución del motor bajo el control programado. Este control será cancelado cuando el arduino maestro envíe una señal distinta en estas banderas.

En la Tabla 4.5, se resume la tabla de verdad y las funciones que cumplen las banderas según el valor que adopten.

Tabla 4.5

Tabla de verdad de las banderas de comunicación entre los microcontroladores

Flag_m	Flag_s	Operación
0	0	Reset de variables
0	1	Lectura
1	0	Ejecución
1	1	Parada

En la operación de lectura, el arduino esclavo, solicita el dato de velocidad al arduino maestro. En la operación de ejecución, el motor entra en funcionamiento. En las funciones de *reset* de variables y parada, el motor se encuentra sin movimiento y las variables se inicializan.

4.4.1. COMUNICACIÓN I²C

Este tipo de comunicación, utiliza dos pines de cada arduino y permite la comunicación de 8 (bits) de datos. El arduino maestro pone a disposición el dato de velocidad en la dirección 1 del bus. El arduino esclavo solicita el dato cuando las banderas se posicionan en los valores de lectura (Figura 4.32).

```
#include <Wire.h> //I2C
void setup() {
  Wire.begin(1);          // dirección 1 en el bus
  Wire.onRequest(requestEvent); // Registro de eventos
}
void requestEvent() // Se ejecuta bajo petición
{
  itoa(vel,buff,10);
  Wire.write(buff); // Envío del dato
}
```

Figura 4.32. Código de envío del dato a través de la comunicación I²C

La programación del arduino esclavo, que solicita el dato al arduino maestro, posicionado en la dirección 1 del bus, se muestra en la Figura 4.33.

```
//inicialización de la comunicación I2C
#include <Wire.h>
void setup() {
  pinMode(flag_s, INPUT);
  pinMode(flag_m, INPUT);
}
void loop() {
  Wire.requestFrom(1, 3);
  while (Wire.available()) {
    dato=Wire.read();
    updateStr(dato);
  }
  Wire.endTransmission();
  vel=atoi(datoAct);
  datoAct[0]='\0';
  datoLen=0;
}
void updateStr(int val){
  if(datoLen<3){
    datoAct[datoLen]=val;
    datoAct[datoLen+1]='\0';
    datoLen++;
  }
  else{
    datoAct[0]='\0';
    datoLen=0;
  }
}
```

Figura 4.33. Código de lectura del dato a través de la comunicación I²C

El código mostrado en la Figura 4.33, transforma el dato textual enviado por el arduino maestro, a un dato numérico que pueda entender el controlador.

4.5. CONEXIÓN DEL SISTEMA

Una vez culminado el proceso de diseño y modelamiento de todos los componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos, de la implementación de la interfaz de usuario, de la programación del control difuso e implementación de los sensores, se resume las acciones que ejecuta cada microcontrolador.

En la Figura 4.34, se puede identificar las respectivas acciones que se encarga el microcontrolador *Master*.

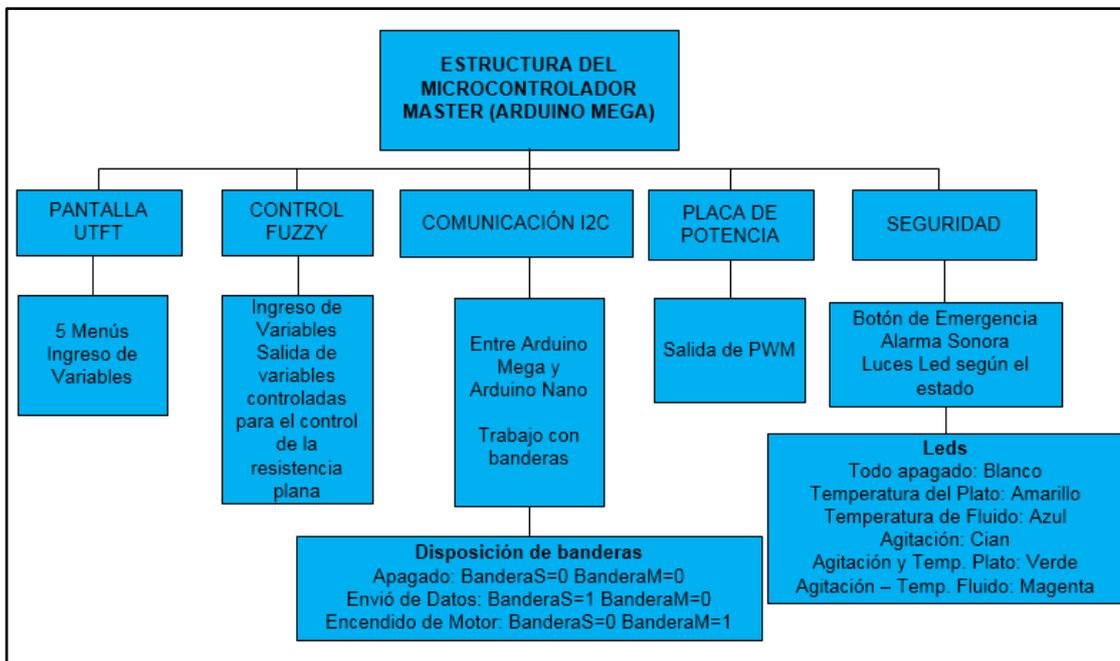


Figura 4.34. Estructura microcontrolador master

En la Figura 4.35, se describe las acciones a cargo del microcontrolador *Esclavo*.

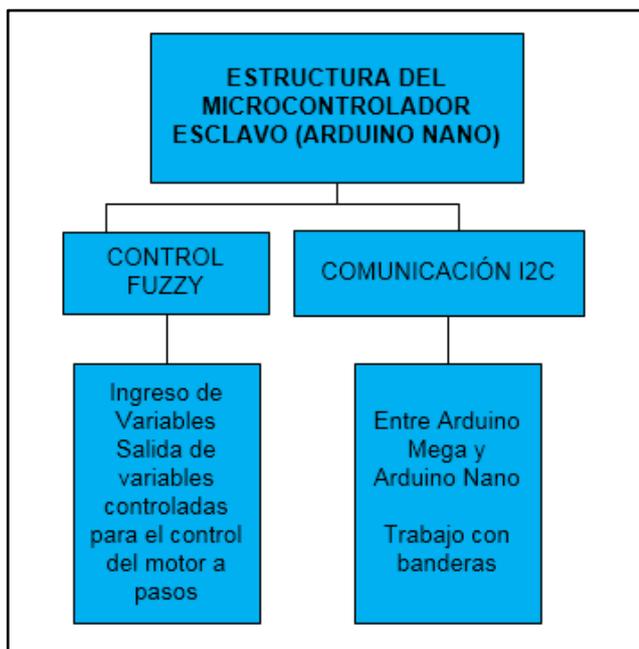


Figura 4.35. Estructura microcontrolador esclavo

A partir de un diagrama de conexión (Figura 4.36), realizado en el software libre Fritzing, se puede observar las conexiones de todos los componentes del equipo y cómo interactúa cada uno de ellos.

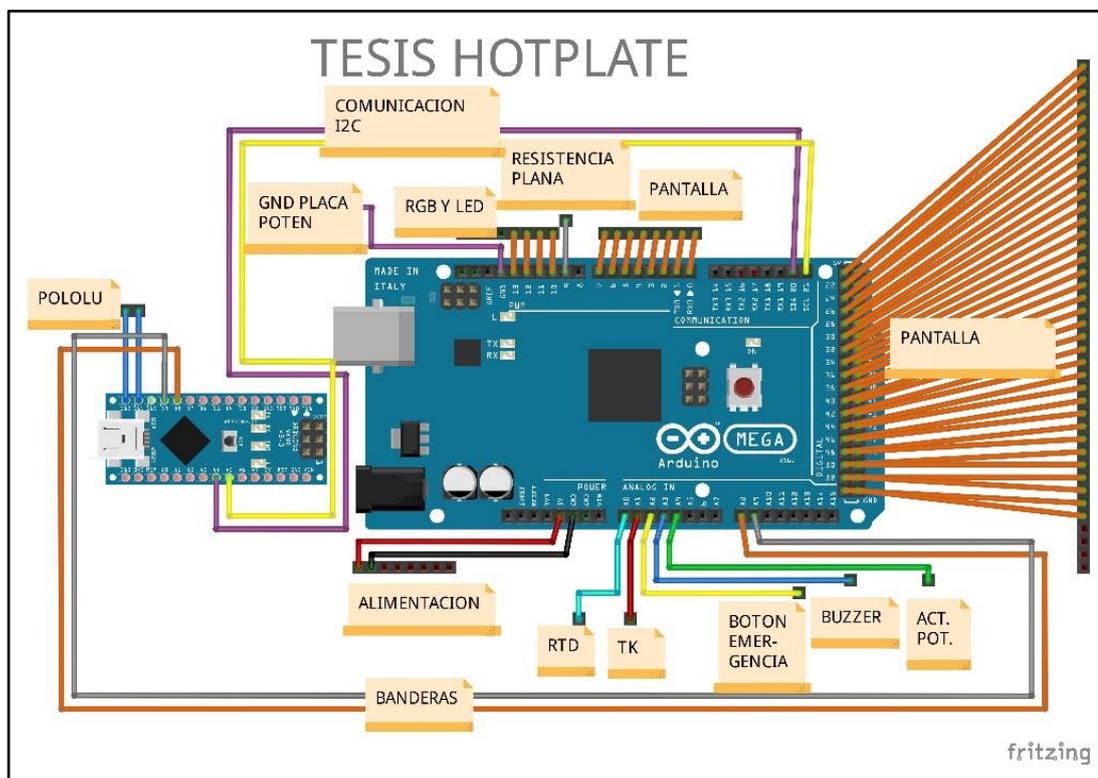


Figura 4.36. Diagrama de conexión

En el diagrama de conexión, se muestra de forma clara, la disposición de cada uno de los pines.

CAPÍTULO 5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO HOT-PLATE

En este capítulo se realizará varias pruebas que permitan validar el diseño del equipo. Tomando en cuenta el planteamiento del problema y los objetivos de este proyecto, se han realizado varios escenarios que simulen el funcionamiento del equipo Hot-Plate en el laboratorio de Biotecnología.

El sistema de control difuso tiene la posibilidad de controlar tres diferentes variables: velocidad, temperatura del plato y temperatura del fluido. La interfaz HMI del equipo, cumple con la función de mostrar y modificar el estado de las variables en ejecución.

Las pruebas detalladas en este documento, se realizaron a una temperatura ambiente que fluctúa los 20 (°C), utilizando un matraz de 500 (ml) y 500 (ml) de agua.

5.1. CURVAS DE FUNCIONAMIENTO

Para verificar que el funcionamiento del equipo cumpla con los requerimientos y necesidades del usuario, se han muestreado datos para cada tipo de control. Estos datos han sido graficados en un software de procesamiento matemático.

5.1.1. CONTROL TÉRMICO SOBRE EL PLATO

Para este control, se han realizado las pruebas con un *set point* de 230 (°C). La Figura 5.1, muestra la curva de control que genera el equipo sobre el plato térmico, en donde se puede observar que el pico máximo es de ± 6 (°C).

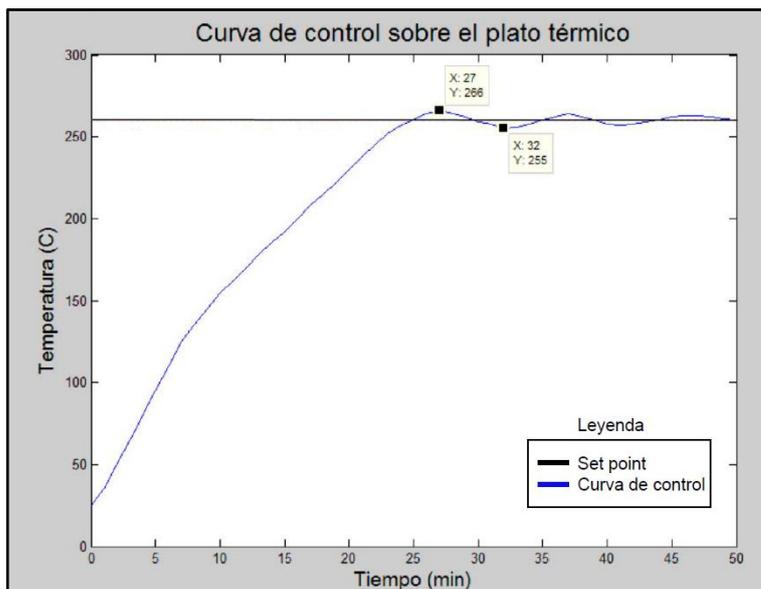


Figura 5.1. Curva de control de temperatura sobre el plato térmico

5.1.2. CONTROL TÉRMICO SOBRE EL FLUIDO

Para controlar esta planta se ha disminuido la potencia de funcionamiento de la resistencia plana. Esto provoca que el sistema se vuelva lento. Las pruebas para este control, se han realizado con un *set point* de 65 (°C). La Figura 5.2, muestra la curva de control que genera el equipo sobre el plato térmico, en donde se puede observar que el pico máximo es de ± 3 (°C).

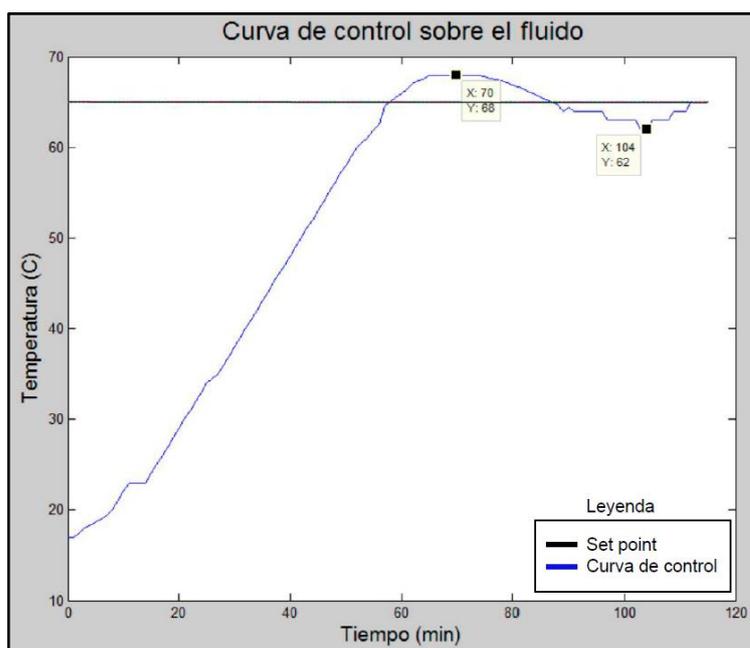


Figura 5.2. Curva de control de temperatura sobre el fluido

5.1.3. CONTROL SOBRE EL MOTOR NEMA 17

El motor se ha controlado en lazo abierto. Este control se ha diseñado permitiendo un error de ± 10 (RPM). Se ha comparado la curva de velocidad de rotación en la planta, con la curva generada por el control sobre el motor.

En la Figura 5.3, se observa la curva del controlador de velocidad sobre el motor Nema 17.

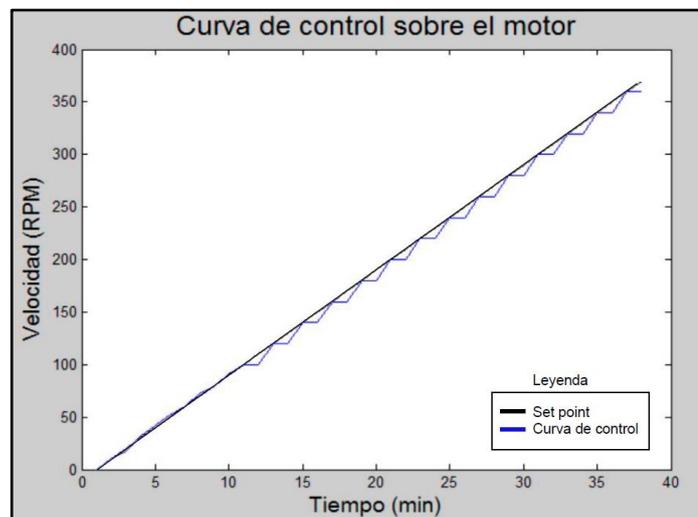


Figura 5.3. Curva de control de velocidad sobre el motor

5.2. CARACTERÍSTICAS FINALES DEL EQUIPO

Probado el funcionamiento del equipo, se procede a indicar sus características finales. En la Tabla 5.1, se resume el rango de operación y las características eléctricas del equipo.

Tabla 5.1

Características finales del equipo

Características	Descripción
Peso (Kg)	8.425 Kg
Voltaje de trabajo (VAC)	110 V
Potencia (W)	620 W
Temperatura de Plato (°C)	[200 320]
Temperatura de Fluido (°C)	[60 100]
Velocidad (RPM)	[10 360]

La Figura 5.4, muestra la fotografía del equipo Hot-Plate armado y en funcionamiento.



Figura 5.4. Fotografía del equipo Hot-Plate

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SISTEMA HOT-PLATE

6.1. ANÁLISIS DE COSTOS

En el análisis financiero se consideran tres aspectos fundamentales, que son:

- Costos Directos
- Costos Indirectos
- Costos Operativos

6.1.1. COSTOS DIRECTOS

Se puede describir como costos directos, a los costos que se relacionen directamente con el producto y la realización de la obra de estudio. Son muy importantes, debido a que sin estos costos no se podrá realizar la obra. Entre estos costos están: materiales mecánicos, eléctricos, electrónicos y mano de obra (Macchia, 2005).

Los costos directos para el proyecto de tesis se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1

Costos Directos

ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL INC. IVA
Pantalla TFT TOUCH & SHEL	2	\$ 66.50	\$ 133.00
Arduino Mega	2	\$ 28.50	\$ 63.84
Arduino Nano	1	\$ 13.00	\$ 13.00
Termocupla tipo K arandela ¼"	1	\$ 30.45	\$ 34.10
RTD 1/8" dia. X 6" largo, cable TFE cable 9 pies de largo	1	\$ 70.19	\$ 78.61
Acoples 1 ¼" de lar. Para T/C de 1/8	1	\$ 17.78	\$ 19.91
Imanes de Neodimio	4	\$ 8.95	\$ 40.10

CONTINÚA →

Motor a Pasos Nema 17	1	\$ 21.88	\$ 24.51
Modulo A 4988	2	\$ 11.88	\$ 26.61
Driver Motor	1	\$ 8.93	\$ 10.00
Placa PCB (Placa de Control)	1	\$ 47.41	\$ 53.10
Cable Sucre 2x14 AWG	3m	\$ 0.99	\$ 3.33
Enchufe 2p 15 ^a 125V	1	\$ 0.85	\$ 0.95
Amarracable Negro 2.5X100mm	1	\$ 0.52	\$ 0.58
Cable Gemelo 2x14	1	\$ 0.76	\$ 0.85
Estructura de Acero Inoxidable	1	\$ 535.71	\$ 600.00
Resistencia Plana	1	\$ 53.57	\$ 60.00
Ad595	2	\$ 20.09	\$ 45.00
Ad620	1	\$ 10.27	\$ 11.50
Spaguetti 4mm	2	\$ 0.67	\$ 1.50
CON HEAD	8	\$ 0.45	\$ 4.03
ZOC 14P	2	\$ 0.09	\$ 0.20
ZOC 8P	1	\$ 0.05	\$ 0.06
ZOC 6P	1	\$ 0.05	\$ 0.06
Terminal Riel H AZ	2	\$ 0.09	\$ 0.20
Term Plano Macho	4	\$ 0.09	\$ 0.40
CE 2200 UF/25V	3	\$ 0.36	\$ 1.21
CE 1000 UF/25V	1	\$ 0.22	\$ 0.25
CE 100 UF/25V	1	\$ 0.13	\$ 0.15
CE 10 UF/25V	6	\$ 0.07	\$ 0.47
CE 3300 UF/25V	2	\$ 0.49	\$ 1.10
CC 33 PF/50V	6	\$ 0.07	\$ 0.47
CC 3.9 NF/50V	3	\$ 0.07	\$ 0.24
BR36-3 ^a /600V	1	\$ 0.31	\$ 0.35
Porta Fusible	1	\$ 0.27	\$ 0.30
LM7912	2	\$ 0.63	\$ 1.41
LM7809	2	\$ 0.49	\$ 1.10
LM7812	2	\$ 0.40	\$ 0.90
Malla	1	\$ 1.34	\$ 1.50
Porta Fusible Cable	1	\$ 0.40	\$ 0.45
Fusible 2 ^a -Peq	4	\$ 0.11	\$ 0.49
Born 2p -AZ	10	\$ 0.22	\$ 2.46
Born 3p-AZ	2	\$ 0.31	\$ 0.69
Born 4p AZ	1	\$ 0.40	\$ 0.45
Moc3041	4	\$ 0.80	\$ 3.58
BT137	2	\$ 0.58	\$ 1.30
BT139	4	\$ 0.85	\$ 3.81
R 10W	6	\$ 0.25	\$ 1.68
R 1/2W	15	\$ 0.03	\$ 0.50
R 1/4W	10	\$ 0.05	\$ 0.56

CONTINÚA →

LM35DZ	1	\$ 2.01	\$ 2.25
Punta de cautín	1	\$ 1.56	\$ 1.75
Disipadores	4	\$ 0.80	\$ 3.58
Disipador Grande	1	\$ 1.60	\$ 1.79
Lija	2	\$ 0.41	\$ 0.92
Relé 5V-5P	1	\$ 0.58	\$ 0.65
PUL 4P-7mm	1	\$ 0.40	\$ 0.45
Transf. 12V	1	\$ 6.92	\$ 7.75
Buzzer Activo	1	\$ 0.58	\$ 0.65
TIP122 NPN	1	\$ 0.58	\$ 0.65
Broca Para Baquelitas 1mm	2	\$ 0.66	\$ 1.47
Broca para Baquelita HSS 1	2	\$ 0.45	\$ 1.01
SW 3P FOCO 2	1	\$ 0.36	\$ 0.40
Led 5mm VE	4	\$ 0.13	\$ 0.58
LED RGB 4P	4	\$ 0.54	\$ 2.42
Pernos	Varios	\$ 1.70	\$ 1.90
Aluminio	1	\$ 11.50	\$ 12.88
Pernos Allen Llaves	Varios	\$ 5.00	\$ 5.60
Alzas para Placa PCB	Varios	\$ 8.00	\$ 8.96
		TOTAL	\$ 1,306.52

6.1.2. COSTOS INDIRECTOS

Se entiende por costos indirectos, a los costos que no se relacionan directamente con el proyecto realizado, pero que son imprescindibles para que se termine el proyecto y que funcione de manera óptima el equipo (Macchia, 2005).

Estos costos son:

- Materiales Indirectos (Tabla 6.2)
- Mano de Obra (Tabla 6.3)
- Costos Operativos (Tabla 6.4)

Tabla 6.2

Costos de Materiales Indirectos

ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL INC. IVA
Planos de fabricación	Varios	\$ 8.00	\$ 8.96
Electrodos WP para TIG [kg]	1	\$ 7.20	\$ 8.06
Estaño [100g]	1	\$ 5.00	\$ 5.60
		TOTAL	\$ 22.62

Tabla 6.3

Costos Indirectos Mano de Obra

DETALLE	TIEMPO	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL INC. IVA
Ingeniería y Diseño	350	\$ 6.00	\$ 2,100.00
Programación y Control	200	\$ 6.00	\$ 1,200.00
Planos	30	\$ 4.00	\$ 120.00
		TOTAL	\$ 3,420.00

Tabla 6.4

Costos Operativos

CONCEPTO	COSTO (USD)
Agua Potable	\$ 10.00
Energía Eléctrica	\$ 40.00
Teléfono	\$ 20.00
Internet	\$ 40.00
Transporte	\$ 15.00
TOTAL	\$ 125.00

Los costos indirectos totales se indican en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5

Costos Indirectos Totales

CONCEPTO	COSTO (USD)
Materiales	\$ 22.62
Mano de Obra	\$ 3,420.00
Costos Operativos	\$ 125.00
TOTAL	\$ 3,567.62

El costo total se indica en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6**Costo Total**

CONCEPTO	COSTO (USD)	%
Costos Directos	\$ 1,306.52	27%
Costos Indirectos	\$ 3,567.62	73%
TOTAL	\$ 4,874.15	

El costo total del proyecto de tesis se puede apreciar en la Tabla 6.6 y tiene un valor total de \$ 4,874.15.

La Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, de manera específica, la carrera de Ingeniería en Biotecnología, ahorra en este prototipo alrededor de un 50%, debido a que equipos similares poseen un costo aproximado de \$4,000.00, ya que el costo de mercado del equipo diseñado sería de \$1,830.00, con un margen de ganancia del 40%

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Se ha diseñado y fabricado un equipo Hot-Plate, con las siguientes características: voltaje de funcionamiento 110 (VAC), potencia 620 (W) y peso de 8.425 (kg).
- El equipo Hot-Plate permite la agitación y el calentamiento de la sustancia, mediante tres tipos de funcionamiento: control de temperatura de plato, control de temperatura del fluido y control de la agitación. Estas opciones pueden trabajar de forma individual o conjunta.
- El sistema de control utilizado en el diseño del equipo está desarrollado en lógica fuzzy y ha sido implementado en arduino, un microcontrolador de acceso y desarrollo libre.
- Los rangos de funcionamiento del equipo Hot-Plate en el control de temperatura del plato son: 200 a 320 (°C).
- Los rangos de funcionamiento del equipo Hot-Plate en el control de temperatura del líquido son: 60 a 100 (°C).
- Los rangos de funcionamiento del equipo Hot-Plate en el control de velocidad de agitación son: 10 a 360 (RPM).
- El equipo es funcional y permite eficiencia energética, pues reduce la potencia utilizada y disminuye los tiempos de funcionamiento, garantizando que el algoritmo de control, cumple los requerimientos exigidos para el desarrollo del proyecto.
- El diseño estructural del equipo, permite que sea resistente a posibles derrames de fluidos cuando el equipo está en funcionamiento.

- El diseño del equipo Hot-Plate, ha permitido implementar nuevas tecnologías, promoviendo de esta manera un repunte en el desarrollo de equipos en el país, enmarcado con el avance tecnológico a nivel mundial.
- El equipo Hot-Plate posee un sistema HMI, completo y de fácil entendimiento, que permite una fácil interacción con el equipo, en el ingreso de datos y la visualización de variables en tiempo real.
- El sistema de seguridad implementado, tiene la posibilidad de mostrar avisos a través de alarmas visuales y auditivas, permitiendo la comunicación al usuario sobre las alertas, para dar aviso sobre la culminación de una tarea programada en el equipo.
- El uso de materiales con un coeficiente de conductividad térmica alto, permite el ahorro de tiempo en la transmisión térmica hacia el fluido, haciendo que el sistema tenga una respuesta más rápida a las acciones de control.
- La selección de elementos se ha hecho de manera correcta, debido a que el dimensionamiento de los componentes electrónicos han permitido obtener los resultados esperados en el funcionamiento del equipo.
- Los planos mecánicos se realizaron según la norma CPE INEN 003, y en concordancia a las normas de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.
- Una vez realizado el análisis económico y las pruebas de funcionamiento se ha determinado que, el desarrollo de este proyecto es una gran aportación para la investigación y desarrollo tecnológico de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

7.2. RECOMENDACIONES

- Utilizar las normas de seguridad y precauciones para el manejo de equipos, en el laboratorio.
- Se recomienda al usuario leer el manual de operación del equipo atentamente, antes de uso del mismo.
- El equipo ha sido diseñado contra el derramamiento de fluidos. A pesar de ello, es recomendable prevenir que los fluidos se derramen sobre el equipo para prolongar la vida útil del equipo.
- Limitar el uso del equipo, permitiendo que la temperatura de la estructura que contiene los elementos electrónicos no sobrepase 70(°C). Por esta razón, se recomienda utilizar en intervalos de 2 horas de funcionamiento y 2 horas apagadas para permitir el enfriamiento de los componentes.
- Cuando se movilice el equipo en un periodo largo de tiempo, verificar todas las conexiones de los distintos componentes eléctricos y electrónicos antes de encender el equipo, para evitar que se produzcan cortocircuitos.
- Se debe de tomar en cuenta las especificaciones técnicas y rangos de trabajo de los sensores, para evitar daños en los equipos electrónicos.
- El presente proyecto, ha sido realizado como un acercamiento al desarrollo de equipos tecnológicos en el país, integrando diversas áreas de investigación, se recomienda realizar proyectos similares con apoyo de entidades públicas y privadas.
- En base a la investigación realizada en este proyecto se recomienda continuar con el desarrollo de equipos similares, con lógica difusa.

7.3. BIBLIOGRAFÍA

- Alves, A. J. (Septiembre de 2012). *eFLL - A Fuzzy Library for Arduino and Embedded Systems*. Obtenido de <http://zerokol.com/>
- Analog Devices, Inc. (Junio de 1999). *AD595*. Obtenido de <http://www.analog.com>
- Analog Devices, Inc. (Enero de 2011). *AD620*. Obtenido de <http://www.analog.com/>
- Ånström, K. J., & Hägglund, T. (2009). Control PID avanzado. En K. J. Ånström, & T. Hägglund, *Control PID avanzado* (Primera ed., págs. 420-427). Madrid, España: Pearson Educación S.A.
- Arduino. (21 de 04 de 2015). *Arduino Home*. Obtenido de <http://www.arduino.cc/>
- Bauer, P., Nouak, S., & Winkler, R. (4 de Diciembre de 1996). *A brief course in Fuzzy Logic and Fuzzy Control*. Recuperado el 5 de Abril de 2015, de <http://aitopics.org>:
<http://www.esru.strath.ac.uk/Reference/concepts/fuzzy/fuzzy.htm>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa*. México D.F.: Mc Graw Hill.
- Chan, T.-F., & Shi, K. (2011). Applied intelligent control of induction motor drives. En T.-F. Chan, & K. Shi, *Applied intelligent control of induction motor drives* (págs. 133-166). Clementi Loop, Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.
- FAIRCHILD. (Septiembre de 2010). *Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output*. Obtenido de <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/MO/MOC3041M.pdf>
- FAIRCHILD. (Septiembre de 2014). *LM7XXX*. Obtenido de <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM7805.pdf>
- Floyd, T. L. (2007). *Principios de Circuitos Eléctricos* (Octava ed.). México DF-México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Girolami, G. S., Rauchfuss, T. B., & Angelici, R. J. (1999). *Synthesis and Technique in Inorganic Chemistry a Laboratory Manual*. Sausalito-EEUU: University Science Books .

- INGECO Z.S. (11 de 2014). *INGECO Z.S.* Obtenido de <http://www.ingecozs.com/>
- IPC. (Mayo de 2003). *Generic Standard on Printed Board Design*. Obtenido de Association connecting electronics industries: <http://www.ipc.org/>
- Irestak Group. (2015). *Tabla de Características Técnicas del Acero Inoxidable*. Iretal Group.
- Jadán, M. (2012). *Manual de Laboratorio Cultivo de Tejidos Vegetales*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador.
- Jantzaen, J. (1998). *Design Of Fuzzy Controllers*. Denmark: Technical University of Denmark.
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*. En B. C. Kuo, *Sistemas de control automático* (Séptima ed., págs. 1-19). México D.F., México: Prentice-Hall.
- LabTech. (2014). *Hotplate Magnetic Stirrer*. Sorisole-Italia : LabTech Srl.
- Lara, H. (13 de Octubre de 2013). *Sistemas de Control Difuso*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador.
- López, A. (2011). *Tecnología de la Fabricación*. Almería: Ingeniería Mecánica.
- Macchia, J. (2005). *Computos, Costos y Presupuestos*. Buenos Aires - Argentina: Nobuko.
- Martín, T., & Serrano, A. (21 de Abril de 2015). *Magnetismo*. Obtenido de http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfísica/asignaturas/física/magnet/intro_magnet.html
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna*. En K. Ogata, *Ingeniería de control moderna* (Tercera ed., págs. 1-12). México D.F., México: Prentice-Hall.
- Pallas Areny, R. (2005). *Sensores y acondicionamiento de señal* (Cuarta ed.). Sevilla, España: MARCOMBO, S.A.
- Phillips, C. L., & Harbor, R. D. (1996). *Feedback Control Systems*. En C. L. Phillips, & R. D. Harbor, *Feedback Control Systems* (Tercera ed., págs. 1-11). New Jersey, U.S.A.: Prentice-Hall, Inc.

- Pololu. (12 de 2014). *Pololu*. Obtenido de Robotics & Electronics:
<https://www.pololu.com/>
- Ramírez Ramos, O. (12 de Junio de 2008). *UDLAP Bibliotecas*. Obtenido de Lógica Difusa:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo_3.html
- Reznik, L. (1997). Fuzzy Controllers. En L. Reznik, *Fuzzy Controllers* (Primera ed.). Leicestershire, Inglaterra: Newnes.
- Roca, W. M. (1993). *Cultivos de Tejidos en la Agricultura*. Cali-Colombia: CIAT.
- Rosinger, A. (1944). *EEUU Patente nº US2350534 A*.
- Ross, T. J. (2004). Fuzzy logic with engineering applications. En T. J. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*. Southern Gate, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- SainSmart. (Noviembre de 2014). *SainSmart 4.3" TFT LCD Touch*. Obtenido de <http://www.sainsmart.com/>
- Schneider Electric Motion. (21 de 04 de 2015). *Nema size 17 1.8º*. Obtenido de www.schneider-electric-motion.us
- Science MED. (2014). *Digital Horplate Magnetic Stirrer and Digital Magnetic Stirrer*. Dantali-India : Science MED Laboratory Instruments.
- SENPLADES. (2012). Transformación de la Matriz Productiva. *Revolución productiva a través del conocimiento y el talento humano*, 32.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). *Física para ciencias e ingeniería* (Séptima ed.). D.F., México: Cengage.
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (1991). Control automático de Procesos. En C. A. Smith, & A. B. Corripio, *Control automático de Procesos* (Primera ed., págs. 17-26). México D.F., México: Limusa.
- Technical Documents. (07 de Junio de 2015). *Tecnoficio*. Obtenido de <http://www.tecnoficio.com/docs/doc64.php>
- Torrente, Ó. (2013). *ARDUINO Curso práctico de formación* (Primera ed.). México DF, México: Alfaomega.

WATLOW. (09 de 2014). *WATLOW*. Obtenido de WATLOW:

<http://www.watlow.com/>

Wildi, T. (2007). *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. México:

Pearson Educación.

CAPÍTULO 8.

ANEXOS

8.2. PLANOS ELÉCTRICOS, ELECTRÓNICOS Y DE CONEXIÓN

8.3. PLANOS MECÁNICOS

8.4. CÓDIGO DE MICROCONTROLADORES

8.4.1. CÓDIGO DEL ARDUINO MEGA

```

/*
                                TESIS HOT-PLATE.
                                ARDUINO MASTER (ARDUINO MEGA).

                                CONTROLADOR DIFUSO, RESISTENCIA PLANA, PANTALLA,
                                COMUNICACIÓN I2C, ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA.

                                *NOTA: PARA MODIFICAR O VISUALIZAR LAS CONEXIONES
                                REVISAR EL DIAGRAMA DE CONEXIÓN EN EL CAPÍTULO DE
                                ANEXOS.

                                DESARROLLADO EN ECUADOR, 2014.
                                POR:
                                HENRY DAVID LOACHAMÍN IZA.
                                DIEGO FERNANDO ÑAUNAY PUENTE.
                                MODIFICADO: 2/07/2015.
                                POR:
                                HENRY DAVID LOACHAMÍN IZA.
                                DIEGO FERNANDO ÑAUNAY PUENTE.
*/
//PROGRAMA:

#if defined(__AVR__)
    #define imagedatatype unsigned int
#elif defined(__PIC32MX__)
    #define imagedatatype unsigned short
#elif defined(__arm__)
    #define imagedatatype unsigned short
#endif

//FUZZY
//INICIALIZACION DE LAS LIBRERIAS FUZZY
#include <FuzzyRule.h>
#include <FuzzyComposition.h>
#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzySet.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>

//INICIALIZACION DE UN NUEVO OBJETO FUZZY
Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();

#include <UTFT.h>
#include <UTouch.h>
#include <UTFT_Buttons.h>
#include <Wire.h> //I2C
#include <Timer.h> //TEMPORIZADOR

extern uint8_t BigFont[];

UTFT    myGLCD(ITDB43,38,39,40,41);
UTouch  myTouch(6,5,4,3,2);
UTFT_Buttons myButtons(&myGLCD, &myTouch);

int x, y;

```

```

char stCurrent[20]=""; //DATO
int stCurrentLen=0; //POSICION
char stLast[20]="";
int menuc=1; //CONTADOR

int temp_plato=0; //VALOR DE TEMPERATURA DEL PLATO
int temp_liquido=0; //VALOR DE TEMPERATURA DEL FLUIDO
int vel=0; //VALOR DE LAS REVOLUCIONES
int Banderatemp=0; //BANDERA DE TEMPERATURA
char tempo[20]="";
char velo[12]="";
int mint=00;
int seg=00;

char buff[3]; //I2C

//Motor
Timer cronometro;
int state=0;
int mostrar_mint=0;
int mostrar_seg=0;
int cro_mint=0;
int cro_seg=0;
long time;
int steps = 13;
int reset = 10;
int a=0;
//

//PT100
float INPUT_PT100 = A0; // select the input pin for the potentiometer
float RES_PT100;
float TEMP_PT100;
float GAIN=1+49.4/0.476;//1+6.8/1.2;
float R1=8200;
float R2=100;
//

//TERMOCUPLAK
float INPUT_K = A1;
float ANALOG_K;
float VOLTAGE_K;
float TEMP_F;
//

//mostrar promedio
float promPT100=0;
float promK=0;

//fuzzy
//Inicialización de variables
float ePlato=25;
float pPwmPlato=0;
int maxPwmPlato=0;
int pwmPlato=0;

int BanderaS=A8; //BANEDERA DE SERIAL
int BanderaM=A9; //BANDERA EJECUCION

int buzzer=A3; // Buzzer

// RESISTENCIA PLANA
int SALIDAPWM=9;
int BOTONEMER=A2; //SALIDA DE BOTON DE EMERGENCIA

```

```

int BOTONEMERIN=A4; //LECTURA DEL ESTADO DE BOTON DE EMERGENCIA
int BOTONREAD=0; //VARIABLE ESTADO DEL BOTON
// LEDS
int LedON=13; //Led de Encendido
int RgbR=10; //Led RGB R
int RgbG=11; //Led RGB G
int RgbB=12; //Led RGB B

void setup()
{
  myGLCD.InitLCD();
  myGLCD.clrScr();
  myGLCD.setFont(BigFont);
  myTouch.InitTouch();
  myTouch.setPrecision(PREC_MEDIUM);
  myButtons.setTextFont(BigFont);
  Serial.begin(9600);
  //FUZZY --CREACION DE LA ENTRADA FUZZY ERROR
  FuzzyInput* errorP = new FuzzyInput(1);

  //CREACION DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESIA DE ENTRADA
  FuzzySet* EP_MP = new FuzzySet(-0.5,-0.5,0,0.55);
  errorP->addFuzzySet(EP_MP);
  FuzzySet* EP_P = new FuzzySet(0.2,0.55,0.55,0.9);
  errorP->addFuzzySet(EP_P);
  FuzzySet* EP_MB = new FuzzySet(0.55,0.9,0.9,1.25);
  errorP->addFuzzySet(EP_MB);
  FuzzySet* EP_M = new FuzzySet(0.9,1.25,1.25,1.6);
  errorP->addFuzzySet(EP_M);
  FuzzySet* EP_MA = new FuzzySet(1.25,1.6,1.6,1.95);
  errorP->addFuzzySet(EP_MA);
  FuzzySet* EP_G = new FuzzySet(1.6,1.95,1.95,2.3);
  errorP->addFuzzySet(EP_G);
  FuzzySet* EP_MG = new FuzzySet(1.95,2.5,3,3);
  errorP->addFuzzySet(EP_MG);

  fuzzy->addFuzzyInput(errorP);

  //CREACION DE LA SALIDA FUZZY RETARDO
  FuzzyOutput* pPwmP = new FuzzyOutput(1);

  //CREACION DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESIA DE SALIDA
  FuzzySet* PwmP_MP = new FuzzySet(-10,-10,0,20);
  pPwmP->addFuzzySet(PwmP_MP);
  FuzzySet* PwmP_P = new FuzzySet(5,20,20,35);
  pPwmP->addFuzzySet(PwmP_P);
  FuzzySet* PwmP_MB = new FuzzySet(20,35,35,50);
  pPwmP->addFuzzySet(PwmP_MB);
  FuzzySet* PwmP_M = new FuzzySet(35,50,50,65);
  pPwmP->addFuzzySet(PwmP_M);
  FuzzySet* PwmP_MA = new FuzzySet(50,65,65,80);
  pPwmP->addFuzzySet(PwmP_MA);
  FuzzySet* PwmP_G = new FuzzySet(65,80,80,95);
  pPwmP->addFuzzySet(PwmP_G);
  FuzzySet* PwmP_MG = new FuzzySet(80,100,120,120);
  pPwmP->addFuzzySet(PwmP_MG);

  fuzzy->addFuzzyOutput(pPwmP);

  //ENSAMBLE DE LAS REGLAS DIFUSAS
  //Regla: "SI errorP = E_MP ENTONCES pPwmP = PwmP_MP"
  FuzzyRuleAntecedent* siEP_MP = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresi3n
  siEP_MP->joinSingle(EP_MP); // Se a1ade la correspondiente funci3n de membresia al antecedente

```

```

FuzzyRuleConsequent* entoncesP_PwmP_MP = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesP_PwmP_MP->addOutput(PwmP_MP);// Se añade la correspondiente función de membresía
a la consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla01 = new FuzzyRule(1, siEP_MP, entoncesP_PwmP_MP); // Se pasa el antecedente
y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla01); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI errorP = E_P ENTONCES pPwmP = PwmP_P"
FuzzyRuleAntecedent* siEP_P = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siEP_P->joinSingle(EP_P); // Se añade la correspondiente función de membresía al antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesP_PwmP_P = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesP_PwmP_P->addOutput(PwmP_P);// Se añade la correspondiente función de membresía a
la consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla02 = new FuzzyRule(2, siEP_P, entoncesP_PwmP_P); // Se pasa el antecedente y la
consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla02); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI errorP = E_MB ENTONCES pPwmP = PwmP_MB"
FuzzyRuleAntecedent* siEP_MB = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siEP_MB->joinSingle(EP_MB); // Se añade la correspondiente función de membresía al antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesP_PwmP_MB = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesP_PwmP_MB->addOutput(PwmP_MB);// Se añade la correspondiente función de membresía
a la consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla03 = new FuzzyRule(3, siEP_MB, entoncesP_PwmP_MB); // Se pasa el antecedente
y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla03); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI errorP = E_M ENTONCES pPwmP = PwmP_M"
FuzzyRuleAntecedent* siEP_M = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siEP_M->joinSingle(EP_M); // Se añade la correspondiente función de membresía al antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesP_PwmP_M = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesP_PwmP_M->addOutput(PwmP_M);// Se añade la correspondiente función de membresía a
la consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla04 = new FuzzyRule(4, siEP_M, entoncesP_PwmP_M); // Se pasa el antecedente y
la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla04); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI errorP = E_MA ENTONCES pPwmP = PwmP_MA"
FuzzyRuleAntecedent* siEP_MA = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siEP_MA->joinSingle(EP_MA); // Se añade la correspondiente función de membresía al antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesP_PwmP_MA = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesP_PwmP_MA->addOutput(PwmP_MA);// Se añade la correspondiente función de membresía
a la consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla05 = new FuzzyRule(5, siEP_MA, entoncesP_PwmP_MA); // Se pasa el antecedente
y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla05); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI errorP = E_G ENTONCES pPwmP = PwmP_G"
FuzzyRuleAntecedent* siEP_G = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siEP_G->joinSingle(EP_G); // Se añade la correspondiente función de membresía al antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesP_PwmP_G = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesP_PwmP_G->addOutput(PwmP_G);// Se añade la correspondiente función de membresía a
la consecuencia

```

```

// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla06 = new FuzzyRule(6, siEP_G, entoncesP_PwmP_G); // Se pasa el antecedente y
la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla06); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI errorP = E_MG ENTONCES pPwmP = PwmP_MG"
FuzzyRuleAntecedent* siEP_MG = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siEP_MG->joinSingle(EP_MG); // Se añade la correspondiente función de membresía al antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesP_PwmP_MG = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesP_PwmP_MG->addOutput(PwmP_MG); // Se añade la correspondiente función de
membresía a la consecuencia
//INICIALIZACION DE LA REGLA DIFUSA
FuzzyRule* regla07 = new FuzzyRule(7, siEP_MG, entoncesP_PwmP_MG); // Se pasa el antecedente
y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla07); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//LCD
myGLCD.fillScr(255,255,255);
myGLCD.setColor(VGA_BLACK); //COLOR DE LAS LETRAS
myGLCD.setBackColor(VGA_WHITE); //COLOR DEL FONDO

//MOTOR
pinMode(steps, OUTPUT);
pinMode(reset, OUTPUT);
digitalWrite(reset, LOW); //Mientras reset este en LOW el motor permanecerá apagado y no sufrirá.
El chip apagará todos los puertos y no leerá comandos.
digitalWrite(reset, HIGH); //Cuando reset se encuentre en HIGH el motor arrancará y leerá los
comandos enviados.

pinMode(BanderaS, OUTPUT);
pinMode(BanderaM, OUTPUT);
pinMode(buzzer, OUTPUT);

//PLACA DE POTENCIA SALIDA DE VARIABLES
pinMode(SALIDAPWM, OUTPUT); //SALIDA CONTROL NIQUELINA
pinMode(BOTONEMER, OUTPUT); //SALIDA BOTON DE EMERGENCIA
pinMode(BOTONEMERIN, INPUT); //ENTRADA LA LECTURA BOTON DE EMERGENCIA

//INICALIZACION
digitalWrite(BOTONEMER, LOW); //PRECAUCION ABIERTO ALIMENTACION PLACA DE
POTENCIA
digitalWrite(buzzer, LOW);

//SALIDA DE PINES LED Y RGB
pinMode(LedON, OUTPUT);
pinMode(RgbR, OUTPUT);
pinMode(RgbG, OUTPUT);
pinMode(RgbB, OUTPUT);

analogWrite(LedON, 10); //LED DE FUNCIONAMINTO
analogWrite(RgbR, 0); //LED RGB
analogWrite(RgbG, 0); //LED RGB
analogWrite(RgbB, 0); //LED RGB

//I2C
Wire.begin(1); // Nos añadimos al bus como esclavo, con la dirección 1
Wire.onRequest(requestEvent); // Registro de eventos

//TEMPORIZADOR
cronometro.every(999,temporizador);

//PANTALLA PRESENTACION
myGLCD.fillScr(255,255,255); //0 0 0

```

```

myGLCD.setColor(0, 0, 255);
myGLCD.drawRoundRect(6,3,470,259);
myGLCD.drawRoundRect(7,4,469,258);
myGLCD.setColor(0, 0, 0); //COLOR DE LOS NUMEROS
myGLCD.print("\nUNIVERSIDAD DE LAS", CENTER, 10);
myGLCD.print("FUERZAS ARMADAS-ESPE", CENTER, 42);
myGLCD.print("INGENIERIA MECATRONICA", CENTER, 74);
myGLCD.print("FUZZY HOT-PLATE", CENTER, 106);
myGLCD.print("DIEGO FERNANDO NAUNAY PUENTE", CENTER, 138);
myGLCD.print("HENRY DAVID LOACHAMIN IZA", CENTER, 170);
myGLCD.print("SANGOLQUI-ECUADOR", CENTER, 202);
myGLCD.print("2015", CENTER, 234);
delay(5000);
}

void updateStr(int val)
{
  if (stCurrentLen<5)
  {
    stCurrent[stCurrentLen]=val;
    stCurrent[stCurrentLen+1]='\0';
    stCurrentLen++;
    myGLCD.setColor(0, 0, 0); //COLOR DE LOS NUMEROS
    myGLCD.print(stCurrent, 4, 200);//LEFT EN X
  }
  else
  {
    myGLCD.setColor(255, 0, 0); //COLOR ROJO
    myGLCD.print("ERROR!", CENTER, 200);
    delay(500);
    myGLCD.print("  ", CENTER, 200);
    delay(500);
    myGLCD.print("ERROR!", CENTER, 200);
    delay(500);
    myGLCD.print("  ", CENTER, 200);
    myGLCD.setColor(255, 255, 255);
    myGLCD.fillRect(0, 200, 280, 239); //BORRA EL CUADRADO DE TEXTO
    stCurrent[0]='\0';
    stCurrentLen=0;
  }
}

void menu()
{
  myGLCD.fillScr(255,255,255); //0 0 0
  int butmenu1, butmenu2, butmenu3, butmenu4,presed_button;
  myGLCD.setColor(0, 0, 0); //COLOR DE LOS NUMEROS
  myGLCD.print("MENU", 175, 3);

  if (temp_liquido>0){
    myGLCD.print("TEMP. FLUIDO:", 10, 210); //VARIABLE ACTUAL MENU
    myGLCD.printNuml(temp_liquido, 220, 210);
  }
  else {
    myGLCD.print("TEMP. PLATO:", 10, 210); //VARIABLE ACTUAL MENU
    myGLCD.printNuml(temp_plato, 200, 210);
  }
  myGLCD.print("VEL.:", 290, 210); //VARIABLE ACTUAL MENU
  myGLCD.printNuml(vel, 370, 210);
  myGLCD.print("TEMPORIZADOR:", 10, 230); //VARIABLE ACTUAL MENU
  myGLCD.printNuml(mint, 220, 230);
  myGLCD.print(":", 250, 230);
  myGLCD.printNuml(seg, 260, 230);
}

```

```

butmenu1 = myButtons.addButton( 30, 30, 180, 80, "TEMPERATURA");
butmenu2 = myButtons.addButton( 220, 30, 180, 80, "VELOCIDAD");
butmenu3 = myButtons.addButton( 30, 120, 180, 80, "TIEMPO");
butmenu4 = myButtons.addButton( 220, 120, 180, 80, "EJECUCION");
myButtons.drawButtons();
menuc=1;
digitalWrite(BanderaS, LOW); //Banderas Inicializacion
digitalWrite(BanderaM, LOW); //Banderas Inicializacion
digitalWrite(buzzer, LOW); //Inicializacion Buzzer

while(1)
{
  if (myTouch.dataAvailable() == true)
  {
    pressed_button = myButtons.checkButtons();
    if (pressed_button==butmenu1)
    {
      myButtons.deleteAllButtons();
      Banderatemp=0;
      menuc=2;
      break;
    }
    if (pressed_button==butmenu2)
    {
      myButtons.deleteAllButtons();
      menuc=3;
      break;
    }
    if (pressed_button==butmenu3)
    {
      myButtons.deleteAllButtons();
      menuc=4;
      break;
    }
    if (pressed_button==butmenu4) //EJECUCION
    {
      myButtons.deleteAllButtons();
      menuc=5;
      break;
    }
  }
}

void temperatura()
{
  myGLCD.fillScr(255,255,255);
  int butliquido,butplato,butmenu,pressed_button;
  myGLCD.print("TEMPERATURA", 150, 3);
  butliquido = myButtons.addButton( 100, 50, 250, 80, "TEMP FLUIDO");
  butplato = myButtons.addButton( 100, 150, 250, 80, "TEMP PLATO");
  butmenu = myButtons.addButton( 380, 180, 90, 60, "MENU");
  myButtons.drawButtons();
  myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
  myGLCD.setBackColor(VGA_WHITE);
  while(1)
  {
    if (myTouch.dataAvailable() == true)
    {
      pressed_button = myButtons.checkButtons();

      if (pressed_button==butliquido)
      {
        myButtons.deleteAllButtons();

```

```

        stCurrent[0]='\0';
        stCurrentLen=0;
        Banderatemp=1;
        menuc=6;
        break;
    }
    if (pressed_button==butplato)
    {
        myButtons.deleteAllButtons();
        stCurrent[0]='\0';
        stCurrentLen=0;
        Banderatemp=2;
        menuc=7;
        break;
    }

    if (pressed_button==butmenu) //va al menu
    {
        myButtons.deleteAllButtons();
        stCurrent[0]='\0';
        stCurrentLen=0;
        menuc=1;
        break;
    }
}
}
}

void temperatura_liquido()
{
    myGLCD.fillScr(255,255,255);
    int but1, but2, but3, but4, but5, but6, but7, but8, but9, but0, butclc, butenter, butmenu, pressed_button;
    myGLCD.print("TEMPERATURA FLUIDO", 100, 3);
    but1 = myButtons.addButton( 30, 30, 60, 60, "1");
    but2 = myButtons.addButton( 100, 30, 60, 60, "2");
    but3 = myButtons.addButton( 170, 30, 60, 60, "3");
    but4 = myButtons.addButton( 240, 30, 60, 60, "4");
    but5 = myButtons.addButton( 310, 30, 60, 60, "5");
    but6 = myButtons.addButton( 30, 100, 60, 60, "6");
    but7 = myButtons.addButton( 100, 100, 60, 60, "7");
    but8 = myButtons.addButton( 170, 100, 60, 60, "8");
    but9 = myButtons.addButton( 240, 100, 60, 60, "9");
    but0 = myButtons.addButton( 310, 100, 60, 60, "0");
    butclc = myButtons.addButton( 380, 30, 90, 60, "CLEAR");
    butenter = myButtons.addButton( 380, 100, 90, 60, "ENTER");
    butmenu = myButtons.addButton( 380, 180, 90, 60, "MENU");
    myButtons.drawButtons();
    myGLCD.print("TEMPERATURA: 60-100[gC]", 10, 180);
    myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
    myGLCD.setBackgroundColor(VGA_WHITE);
    while(1)
    {
        if (myTouch.dataAvailable() == true)
        {
            pressed_button = myButtons.checkButtons();

            if (pressed_button==but1)
            {
                updateStr('1');
            }
            if (pressed_button==but2)
            {
                updateStr('2');
            }
        }
    }
}

```

```

if (pressed_button==but3)
{
  updateStr('3');
}
if (pressed_button==but4)
{
  updateStr('4');
}
if (pressed_button==but5)
{
  updateStr('5');
}
if (pressed_button==but6)
{
  updateStr('6');
}
if (pressed_button==but7)
{
  updateStr('7');
}
if (pressed_button==but8)
{
  updateStr('8');
}
if (pressed_button==but9)
{
  updateStr('9');
}
if (pressed_button==but0)
{
  updateStr('0');
}

if (pressed_button==butclc)
{
  stCurrent[0]='\0';
  stCurrentLen=0;
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239);
}
if (pressed_button==butenter)
{
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239);
  temp_liquido=atoi(stCurrent); //array de char a int
  temp_plato=0;
  Serial.println(temp_liquido);
  myGLCD.setColor(VGA_RED);
  myGLCD.setBackColor(VGA_AQUA);
  myGLCD.print("TEMP IN", 100, 200);
  //myGLCD.print(stCurrent, 100, 220);
  myGLCD.printNumI(temp_liquido, 100, 220);
  myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
  myGLCD.setBackColor(VGA_WHITE);
  stCurrentLen=0; //regresar al inicio
  stCurrent[0]='\0';
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.fillRect(0, 200, 80, 239);
  //RESTRICCION 60-100
  if (temp_liquido>0)
  {
    if (temp_liquido<60 || temp_liquido>100)
    {
      myGLCD.setColor(255, 255, 255);
    }
  }
}

```

```

myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239);
myGLCD.setColor(255, 0, 0); //COLOR ROJO
myGLCD.print("ERROR!", CENTER, 200);
delay(500);
myGLCD.print("  ", CENTER, 200);
delay(500);
myGLCD.print("ERROR!", CENTER, 200);
delay(500);
myGLCD.print("60-100 gC", CENTER, 200);
delay(2000);
myGLCD.print("  ", CENTER, 200);
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239); //BORRA EL CUADRADO DE TEXTO
stCurrent[0]='\0';
stCurrentLen=0;
temp_liquido=0;
}
}
}

if (pressed_button==butmenu) //va al menu
{
myButtons.deleteAllButtons();
stCurrent[0]='\0';
stCurrentLen=0;
menuc=1;
break;
}
}
}
}

void temperatura_plato()
{
myGLCD.fillRect(255,255,255);
int but1, but2, but3, but4, but5,but6,but7,but8,but9,but0,butclc,butenter,butmenu, pressed_button;
myGLCD.print("TEMPERATURA PLATO", 100, 3);
but1 = myButtons.addButton( 30, 30, 60, 60, "1");
but2 = myButtons.addButton( 100, 30, 60, 60, "2");
but3 = myButtons.addButton( 170, 30, 60, 60, "3");
but4 = myButtons.addButton( 240, 30, 60, 60, "4");
but5 = myButtons.addButton( 310, 30, 60, 60, "5");
but6 = myButtons.addButton( 30, 100, 60, 60, "6");
but7 = myButtons.addButton( 100, 100, 60, 60, "7");
but8 = myButtons.addButton( 170, 100, 60, 60, "8");
but9 = myButtons.addButton( 240, 100, 60, 60, "9");
but0 = myButtons.addButton( 310, 100, 60, 60, "0");
butclc = myButtons.addButton( 380, 30, 90, 60, "CLEAR");
butenter = myButtons.addButton( 380, 100, 90, 60, "ENTER");
butmenu = myButtons.addButton( 380, 180, 90, 60, "MENU");
myButtons.drawButtons();
myGLCD.print("TEMPERATURA: 200-320[gC]", 10, 180);
myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
myGLCD.setBackColor(VGA_WHITE);
while(1)
{
if (myTouch.dataAvailable() == true)
{
pressed_button = myButtons.checkButtons();

if (pressed_button==but1)
{
updateStr('1');
}
}
}
}

```

```

if (pressed_button==but2)
{
  updateStr('2');
}
if (pressed_button==but3)
{
  updateStr('3');
}
if (pressed_button==but4)
{
  updateStr('4');
}
if (pressed_button==but5)
{
  updateStr('5');
}
if (pressed_button==but6)
{
  updateStr('6');
}
if (pressed_button==but7)
{
  updateStr('7');
}
if (pressed_button==but8)
{
  updateStr('8');
}
if (pressed_button==but9)
{
  updateStr('9');
}
if (pressed_button==but0)
{
  updateStr('0');
}
if (pressed_button==butclc)
{
  stCurrent[0]='\0';
  stCurrentLen=0;
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239);
}
if (pressed_button==butenter)
{
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239);
  temp_plato=atoi(stCurrent); //array de char a int
  temp_liquido=0; //
  Serial.println(temp_plato);
  myGLCD.setColor(VGA_RED);
  myGLCD.setBackColor(VGA_AQUA);
  myGLCD.print("TEMP IN", 100, 200);
  myGLCD.printNum1(temp_plato, 100, 220);
  myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
  myGLCD.setBackColor(VGA_WHITE);
  stCurrentLen=0; //regresar al inicio
  stCurrent[0]='\0';
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.fillRect(0, 200, 80, 239);
  //RESTRICCION 200-320
  if (temp_plato>0)
  {
    if (temp_plato<200 || temp_plato>320)

```

```

    {
        myGLCD.setColor(255, 255, 255);
        myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239);
        myGLCD.setColor(255, 0, 0); //COLOR ROJO
        myGLCD.print("ERROR!", CENTER, 200);
        delay(500);
        myGLCD.print(" ", CENTER, 200);
        delay(500);
        myGLCD.print("ERROR!", CENTER, 200);
        delay(500);
        myGLCD.print("0-320 gC", CENTER, 200);
        delay(2000);
        myGLCD.print(" ", CENTER, 200);
        myGLCD.setColor(255, 255, 255);
        myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239); //BORRA EL CUADRADO DE TEXTO
        stCurrent[0]='\0';
        stCurrentLen=0;
        temp_plato=0;
    }
}
}
if (pressed_button==butmenu) //va al menu
{
    myButtons.deleteAllButtons();
    stCurrent[0]='\0';
    stCurrentLen=0;
    menuc=1;
    break;
}
}
}
}

void velocidad()
{
    myGLCD.fillScr(255,255,255);
    int but1, but2, but3, but4, but5,but6,but7,but8,but9,but0,butclc,butenter,butmenu, pressed_button;
    myGLCD.print("VELOCIDAD", 150, 3);
    but1 = myButtons.addButton( 30, 30, 60, 60, "1");
    but2 = myButtons.addButton( 100, 30, 60, 60, "2");
    but3 = myButtons.addButton( 170, 30, 60, 60, "3");
    but4 = myButtons.addButton( 240, 30, 60, 60, "4");
    but5 = myButtons.addButton( 310, 30, 60, 60, "5");
    but6 = myButtons.addButton( 30, 100, 60, 60, "6");
    but7 = myButtons.addButton( 100, 100, 60, 60, "7");
    but8 = myButtons.addButton( 170, 100, 60, 60, "8");
    but9 = myButtons.addButton( 240, 100, 60, 60, "9");
    but0 = myButtons.addButton( 310, 100, 60, 60, "0");
    butclc = myButtons.addButton( 380, 30, 90, 60, "CLEAR");
    butenter = myButtons.addButton( 380, 100, 90, 60, "ENTER");
    butmenu = myButtons.addButton( 380, 180, 90, 60, "MENU");
    myButtons.drawButtons();
    myGLCD.print("VELOCIDAD: 10-360[RPM]", 10, 180);
    myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
    myGLCD.setBackColor(VGA_WHITE);
    while(1)
    {
        if (myTouch.dataAvailable() == true)
        {
            pressed_button = myButtons.checkButtons();

            if (pressed_button==but1)
            {
                updateStr('1');
            }
        }
    }
}

```

```

}
if (pressed_button==but2)
{
  updateStr('2');
}
if (pressed_button==but3)
{
  updateStr('3');
}
if (pressed_button==but4)
{
  updateStr('4');
}
if (pressed_button==but5)
{
  updateStr('5');
}
if (pressed_button==but6)
{
  updateStr('6');
}
if (pressed_button==but7)
{
  updateStr('7');
}
if (pressed_button==but8)
{
  updateStr('8');
}
if (pressed_button==but9)
{
  updateStr('9');
}
if (pressed_button==but0)
{
  updateStr('0');
}
if (pressed_button==butclc)
{
  stCurrent[0]='\0';
  stCurrentLen=0;
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239);
}
if (pressed_button==butenter)
{
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239);
  vel=atoi(stCurrent); //array de char a int
  Serial.println(vel);
  myGLCD.setColor(VGA_RED);
  myGLCD.setBackColor(VGA_AQUA);
  myGLCD.print("VEL IN", 100, 200);
  myGLCD.printNum1(vel, 100, 220);
  myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
  myGLCD.setBackColor(VGA_WHITE);
  stCurrentLen=0; //regresar al inicio
  stCurrent[0]='\0';
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.fillRect(0, 200, 80, 239);
  //RESTRINGIR VELOCIDAD 10RPM, 360RPM
  if (vel>0){
  if (vel<10 || vel>360)
  {

```

```

myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239);
myGLCD.setColor(255, 0, 0); //COLOR ROJO
myGLCD.print("ERROR!", CENTER, 200);
delay(500);
myGLCD.print(" ", CENTER, 200);
delay(500);
myGLCD.print("ERROR!", CENTER, 200);
delay(500);
myGLCD.print("10-360 RPM", CENTER, 200);
delay(2000);
myGLCD.print(" ", CENTER, 200);
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.fillRect(0, 200, 319, 239); //BORRA EL CUADRADO DE TEXTO
stCurrent[0]='\0';
stCurrentLen=0;
vel=0;
}
}
//ENVIO DATO
digitalWrite(BanderaS, HIGH);
digitalWrite(BanderaM, LOW);

delay(100);
digitalWrite(BanderaS, LOW);
digitalWrite(BanderaM, LOW);
}
if (pressed_button==butmenu) //va al menu
{
myButtons.deleteAllButtons();
stCurrent[0]='\0';
stCurrentLen=0;
menuc=1;
break;
}
}
}
}

void tiempo()
{
myGLCD.fillScr(255,255,255);
int but1, but2, but3, but4, but5,but6,but7,but8,but9,but0,butclc,butmin,butseg,butmenu,
pressed_button;
myGLCD.print("TEMPORIZADOR", 150, 3);
but1 = myButtons.addButton( 30, 30, 60, 60, "1");
but2 = myButtons.addButton( 100, 30, 60, 60, "2");
but3 = myButtons.addButton( 170, 30, 60, 60, "3");
but4 = myButtons.addButton( 240, 30, 60, 60, "4");
but5 = myButtons.addButton( 310, 30, 60, 60, "5");
but6 = myButtons.addButton( 30, 100, 60, 60, "6");
but7 = myButtons.addButton( 100, 100, 60, 60, "7");
but8 = myButtons.addButton( 170, 100, 60, 60, "8");
but9 = myButtons.addButton( 240, 100, 60, 60, "9");
but0 = myButtons.addButton( 310, 100, 60, 60, "0");
butclc = myButtons.addButton( 380, 30, 90, 60, "CLEAR");
butmin = myButtons.addButton( 380, 100, 90, 60, "MIN");
butseg = myButtons.addButton( 286, 180, 90, 60, "SEG");
butmenu = myButtons.addButton( 380, 180, 90, 60, "MENU");
myButtons.drawButtons();
myGLCD.print("TIEMPO:", 10, 180);
myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
myGLCD.setBackgroundColor(VGA_WHITE);
while(1)

```

```

{
  if (myTouch.dataAvailable() == true)
  {
    pressed_button = myButtons.checkButtons();

    if (stCurrentLen>1) //restriccion de los 2 digitos
    {
      stCurrentLen=5;
    }
    if (pressed_button==but1)
    {
      updateStr('1');
    }
    if (pressed_button==but2)
    {
      updateStr('2');
    }
    if (pressed_button==but3)
    {
      updateStr('3');
    }
    if (pressed_button==but4)
    {
      updateStr('4');
    }
    if (pressed_button==but5)
    {
      updateStr('5');
    }
    if (pressed_button==but6)
    {
      updateStr('6');
    }
    if (pressed_button==but7)
    {
      updateStr('7');
    }
    if (pressed_button==but8)
    {
      updateStr('8');
    }
    if (pressed_button==but9)
    {
      updateStr('9');
    }
    if (pressed_button==but0)
    {
      updateStr('0');
    }
    if (pressed_button==butclc)
    {
      stCurrent[0]='\0';
      stCurrentLen=0;
      myGLCD.setColor(255, 255, 255);
      myGLCD.fillRect(0, 200, 280, 239);
    }
    if (pressed_button==butmin)
    {
      myGLCD.setColor(255, 255, 255);
      myGLCD.fillRect(0, 200, 80, 239);
      mint=atoi(stCurrent); //array de char a int
      Serial.println(mint);
      myGLCD.setColor(VGA_RED);
      myGLCD.setBackColor(VGA_AQUA);
    }
  }
}

```

```

myGLCD.print("MIN", 80, 200);
myGLCD.printNumI(mint, 80, 220);
myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
myGLCD.setBackColor(VGA_WHITE);
stCurrentLen=0; //regresar al inicio
stCurrent[0]='\0';
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.fillRect(0, 200, 80, 239);
}
if (pressed_button==butseg)
{
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.fillRect(0, 200, 80, 239);
seg=atoi(stCurrent); //array de char a int
Serial.print("Seg:");
Serial.println(seg);
myGLCD.setColor(VGA_RED);
myGLCD.setBackColor(VGA_AQUA);
myGLCD.print("SEG", 140, 200);
myGLCD.printNumI(seg, 140, 220);
myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
myGLCD.setBackColor(VGA_WHITE);
stCurrentLen=0; //regresar al inicio
stCurrent[0]='\0';
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
}
if (pressed_button==butmenu) //va al menu
{
myButtons.deleteAllButtons();
time=mint*60+seg; //TRANSFORMACION A SEGUNDOS
stCurrent[0]='\0';
stCurrentLen=0;
menuc=1;
break;
}
}
}
}

void ejecucion()
{
myGLCD.fillScr(255,255,255);
int but2,butmenu, pressed_button;
myGLCD.print("EJECUCIÓN", 150, 3);
but2 = myButtons.addButton( 280, 170, 190, 80, "MENU");
myButtons.drawButtons();
digitalWrite(BanderaS, HIGH);
digitalWrite(BanderaM, LOW);
delay(100);
digitalWrite(BanderaS, LOW);
digitalWrite(BanderaM, LOW);
delay(2);
digitalWrite(BanderaS, LOW);
digitalWrite(BanderaM, HIGH);
float acumuladorPT100=0;
float acumuladorK=0;
int cont=1;
float DatoPWM=0; //Valor de PWM segun rangos
time=mint*60+seg;
digitalWrite(BOTONEMER, HIGH); //RELE
digitalWrite(buzzer, LOW);
float residuo=0; //TEMPORIZADOR
while(1)
{

```

```

if (temp_plato>10 && temp_liquido<10 && vel<=0)
{
//TEMPERATURA DEL PLATO
analogWrite(RgbR, 0); //LED RGB
analogWrite(RgbG, 50); //LED RGB
analogWrite(RgbB, 255); //LED RGB
}
if (temp_plato<10 && temp_liquido>10 && vel<=0)
{
//TEMPERATURA DEL LIQUIDO
analogWrite(RgbR, 255); //LED RGB
analogWrite(RgbG, 255); //LED RGB
analogWrite(RgbB, 0); //LED RGB
}
if (temp_plato<10 && temp_liquido<10 && vel>0)
{
//AGITACION
analogWrite(RgbR, 255); //LED RGB
analogWrite(RgbG, 0); //LED RGB
analogWrite(RgbB, 0); //LED RGB

digitalWrite(BOTONEMER, LOW); //PLACA DE POTENCIA APAGADA
}
if (temp_plato==0 && temp_liquido==0 && vel==0)
{
//TODO APAGADO
analogWrite(RgbR, 0); //LED RGB
analogWrite(RgbG, 0); //LED RGB
analogWrite(RgbB, 0); //LED RGB

digitalWrite(BOTONEMER, LOW); //PLACA DE POTENCIA APAGADA
}
if(vel>10)
{
if (temp_plato>10 && temp_liquido<10){
analogWrite(RgbR, 255); //LED RGB
analogWrite(RgbG, 0); //LED RGB
analogWrite(RgbB, 255); //LED RGB
}
if (temp_plato<10 && temp_liquido>10){
analogWrite(RgbR, 0); //LED RGB
analogWrite(RgbG, 255); //LED RGB
analogWrite(RgbB, 0); //LED RGB
}
}
}
if (cont>9){
cont=1;
acumuladorPT100=0;
acumuladorK=0;
}
BOTONREAD=digitalRead(BOTONEMERIN);
if (BOTONREAD==HIGH)
{
digitalWrite(BOTONEMER, LOW); //DESCONEXION POTENCIA
digitalWrite(buzzer, HIGH); //AVISO SONORO
digitalWrite(BanderaS, LOW); //DESACTIVA BANDERAS MOTOR
digitalWrite(BanderaM, LOW); //DESACTIVA BANDERAS MOTOR
//PANTALLA
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.fillRect(0, 200, 219, 239);
myGLCD.setColor(255, 0, 0); //COLOR ROJO
myGLCD.print("EMERGENCIA!", 10, 200);
delay(500);
digitalWrite(buzzer, LOW); //apago buzzer

```

```

myGLCD.print("      ", 10, 200);
delay(500);
myGLCD.print("EMERGENCIA!", 10, 200);
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.fillRect(0, 200, 219, 239); //BORRA EL CUADRADO DE TEXTO
//LED
digitalWrite(RgbR, 0); //LED RGB
digitalWrite(RgbG, 255); //LED RGB
digitalWrite(RgbB, 255); //LED RGB
}
else
{
if(temp_liquido>10 || temp_plato>10)
{
digitalWrite(BOTONEMER, HIGH); //CONEXION POTENCIA
}
digitalWrite(buzzer, LOW); //AVISO SONORO
digitalWrite(BanderaS, LOW); //DEACTIVA BANDERAS MOTOR
digitalWrite(BanderaM, HIGH); //DEACTIVA BANDERAS MOTOR
Serial.print("DEACTIVADO");
}

//PT100
RES_PT100= analogRead(INPUT_PT100); //lectura de voltaj
RES_PT100=RES_PT100*4.9/1023;
RES_PT100=(RES_PT100*(R1+R2)*(R1+R2))/(5*GAIN*R1-RES_PT100*(R2+R1))+R2;
//cambio a resistencia (100 valor de resistencia)
TEMP_PT100=((RES_PT100/100)-1)/0.003850/1.085;
acumuladorPT100=acumuladorPT100+TEMP_PT100;

//TERMOCUPLA K
ANALOG_K= analogRead(INPUT_K); //lectura de voltaje
VOLTAGE_K=ANALOG_K*4.9*100/1023;
TEMP_F=VOLTAGE_K-5;
acumuladorK=acumuladorK+TEMP_F;

if (mint>0 || seg >0)
{
residuo=cont % 3;
if (residuo==0)
{
if (time>0){
time=time-1; //Cronometro por codigo
mostrar_mint=time/60;//para mostrar el cronometro
mostrar_seg=time-60*mostrar_mint;//para mostrar el cronometro
if(mostrar_seg==9){
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.fillRect(55, 165, 280, 200);
myGLCD.setColor(VGA_BLACK); //COLOR DE LAS LETRAS
}
if(mostrar_mint==9 && mostrar_seg==59){
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.fillRect(0, 165, 50, 200);
myGLCD.setColor(VGA_BLACK); //COLOR DE LAS LETRAS
}
}
}
if (time==0){
digitalWrite(buzzer, HIGH); //AVISO SONORO
}
}
}
}
delay (55);
if(cont==9){
promPT100=acumuladorPT100/10;
}

```

```

    promK=acumuladorK/10;
  }
cont=cont+1;
myGLCD.setColor(VGA_BLACK); //COLOR DE LAS LETRAS
myGLCD.print("TEMP. FLUIDO",3, 50);
myGLCD.printNumF(promPT100,1, 70, 70);
myGLCD.print("TEMP. PLATO",3, 100);
myGLCD.printNumF(promK,1, 70, 120);
myGLCD.print("VEL. MOTOR",220, 50);
myGLCD.printNumF(vel,1, 250, 70);
if (temp_liquido>0)
{
myGLCD.print("TEMP. REQ. FLUIDO",190, 100);
myGLCD.printNumF(temp_liquido,1, 250, 120);
ePlato=temp_liquido-promPT100;
if (temp_liquido<70 && temp_liquido>=60)
{
    maxPwmPlato=60;
}
if (temp_liquido<80 && temp_liquido>=70)
{
    maxPwmPlato=70;
}
if (temp_liquido<90 && temp_liquido>=80)
{
    maxPwmPlato=80;
}
if (temp_liquido>=90)
{
    maxPwmPlato=150;

    if (ePlato>20)
    {
        maxPwmPlato=200;
    }
}
pwmPlato=maxPwmPlato; //desde el inicio
if (ePlato<=5){
    float error1;
    error1=ePlato/2;
    fuzzy->setInput(1,error1);
    fuzzy->fuzzify();
    pPwmPlato=fuzzy->defuzzify(1);
    pwmPlato=(pPwmPlato*pwmPlato/100);
}
if (ePlato<0)
{
    pwmPlato=0;
}
}
analogWrite(SALIDAPWM, pwmPlato);
}
else
{
    myGLCD.print("TEMP. REQ. PLATO",200, 100);
    myGLCD.printNumF(temp_plato,1, 250, 120);
    ePlato=temp_plato-promK;
    pwmPlato=200; //PWM Inicial
    if (temp_plato<320 && temp_plato>=300)
    {
        maxPwmPlato=200;
    }
    if (temp_plato<300 && temp_plato>=270)
    {
        maxPwmPlato=175;
    }
}
}

```

```

}
if (temp_plato<270 && temp_plato>=240)
{
  maxPwmPlato=150;
}
if (temp_plato<240 && temp_plato>=210)
{
  maxPwmPlato=125;
}
if (temp_plato<210 && temp_plato>=180)
{
  maxPwmPlato=100;
}
if (temp_plato<180 && temp_plato>=150)
{
  maxPwmPlato=80;
}
if (temp_plato<150 && temp_plato>=120)
{
  maxPwmPlato=60;
}
pwmPlato=maxPwmPlato; //desde el inicio
if (ePlato<15)
{
  if (ePlato<=2.5){
    float error1;
    error1=ePlato;
    fuzzy->setInput(1,error1);
    fuzzy->fuzzify();
    pPwmPlato=fuzzy->defuzzify(1);
    pwmPlato=(pPwmPlato*pwmPlato/100);
  }
  if (ePlato<0)
  {
    pwmPlato=0;
  }
}
analogWrite(SALIDAPWM, pwmPlato);
}
myGLCD.print("TIEMPO",50, 150);
myGLCD.printNumI(mostrar_mint, 60, 170);
myGLCD.print(":",90, 170);
myGLCD.printNumI(mostrar_seg, 100, 170);
if (myTouch.dataAvailable() == true)
{
  pressed_button = myButtons.checkButtons();
  if (pressed_button==but2)
  {
    digitalWrite(BanderaS, LOW);
    digitalWrite(BanderaM, LOW); //Desactivo la Bandera
    digitalWrite(BOTONEMER, LOW); //DESACTIVO LA PLACA DE POTENCIA
    digitalWrite(RgbR, 0); //LED RGB
    digitalWrite(RgbG, 0); //LED RGB
    digitalWrite(RgbB, 0); //LED RGB
    myButtons.deleteAllButtons();
    time=0;
    state=0;
    menuc=1;
    break;
  }
}
}
}
}

```

```

void temporizador(){
  time=time-1;
  Serial.print("interrupcion");
  Serial.println(time); //mostrar los segundos
  if(time>0){
    mostrar_mint=time/60;
    mostrar_seg=time-60*mostrar_mint;
    if(mostrar_seg==9){
      myGLCD.setColor(255, 255, 255);
      myGLCD.fillRect(0, 160, 280, 180);
      myGLCD.setColor(VGA_BLACK); //COLOR DE LAS LETRAS
    }
    if(mostrar_mint==9 && mostrar_seg==59){
      myGLCD.setColor(255, 255, 255);
      myGLCD.fillRect(0, 160, 280, 180);
      myGLCD.setColor(VGA_BLACK); //COLOR DE LAS LETRAS
    }
  }
}

void requestEvent() // Función que se ejecuta cuando recibe una petición desde el maestro
{
  itoa(vel,buff,10);
  Wire.write(buff); // Responde a la petición del maestro de enviarle 12 bytes
}

void loop()
{
  while(1)
  {
    if (menuc==1)
    {
      menu();
    }
    if (menuc==2)
    {
      temperatura();
    }
    if (menuc==3)
    {
      velocidad();
    }
    if (menuc==4)
    {
      tiempo();
    }
    if (menuc==5)
    {
      ejecucion();
    }

    if (menuc==6)
    {
      temperatura_liquido();
    }
    if (menuc==7)
    {
      temperatura_plato();
    }
  }
}

```

8.4.2. CÓDIGO DEL ARDUINO NANO

```

/*
                                TESIS HOT-PLATE.
                                ARDUINO SLAVE (ARDUINO NANO).

                                CONTROLADOR DIFUSO PARA EL MOTOR NEMA17.

                                *NOTA: PARA MODIFICAR O VISUALIZAR LAS CONEXIONES
                                REVISAR EL DIAGRAMA DE CONEXIÓN EN EL CAPÍTULO DE
                                ANEXOS.

                                DESARROLLADO EN ECUADOR, 2014.
                                POR:
                                HENRY DAVID LOACHAMÍN IZA.
                                DIEGO FERNANDO ÑAUNAY PUENTE.
                                MODIFICADO: 2/07/2015.
                                POR:
                                HENRY DAVID LOACHAMÍN IZA.
                                DIEGO FERNANDO ÑAUNAY PUENTE.

*/
//PROGRAMA:

//inicialización de la comunicación I2C
#include <Wire.h>

//inicialización de las librerías fuzzy
#include <FuzzyRule.h>
#include <FuzzyComposition.h>
#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzySet.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>

//Inicialización de un nuevo objeto fuzzy
Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();

//Inicialización de entradas y salidas
int steps = 11;
int reset = 12;
int flag_s=8;
int flag_m=9;

//Inicialización de variables
float t=200;
long vel=10;
char dato;
char datoAct[3]="";
int datoLen=0;
float tiempo;

void setup() {
//Inicialización de la comunicación serial e I2C
Serial.begin(9600);
Wire.begin();

//Creación de la entrada fuzzy velocidad
FuzzyInput* velocidad = new FuzzyInput(1);

//Creación de las funciones de membresía de entrada
FuzzySet* V120 = new FuzzySet(105,105,120,135);

```

```

velocidad->addFuzzySet(V120);
FuzzySet* V140 = new FuzzySet(125,140,140,155);
velocidad->addFuzzySet(V140);
FuzzySet* V160 = new FuzzySet(145,160,160,175);
velocidad->addFuzzySet(V160);
FuzzySet* V180 = new FuzzySet(165,180,180,195);
velocidad->addFuzzySet(V180);
FuzzySet* V200 = new FuzzySet(185,200,200,215);
velocidad->addFuzzySet(V200);
FuzzySet* V220 = new FuzzySet(205,220,220,235);
velocidad->addFuzzySet(V220);
FuzzySet* V240 = new FuzzySet(225,240,240,255);
velocidad->addFuzzySet(V240);
FuzzySet* V260 = new FuzzySet(245,260,260,275);
velocidad->addFuzzySet(V260);
FuzzySet* V280 = new FuzzySet(265,280,280,295);
velocidad->addFuzzySet(V280);
FuzzySet* V300 = new FuzzySet(285,300,300,315);
velocidad->addFuzzySet(V300);
FuzzySet* V320 = new FuzzySet(305,320,320,335);
velocidad->addFuzzySet(V320);
FuzzySet* V340 = new FuzzySet(325,340,340,355);
velocidad->addFuzzySet(V340);
FuzzySet* V360 = new FuzzySet(345,360,375,375);
velocidad->addFuzzySet(V360);

fuzzy->addFuzzyInput(velocidad);

//Creación de la salida fuzzy retardo
FuzzyOutput* retardo = new FuzzyOutput(1);

//Creación de las funciones de membresía de salida
FuzzySet* T360 = new FuzzySet(22.7,22.7,24.7,26);
retardo->addFuzzySet(T360);
FuzzySet* T340 = new FuzzySet(25.3,26.8,27.8,29.3);
retardo->addFuzzySet(T340);
FuzzySet* T320 = new FuzzySet(28.5,30,31.5,33);
retardo->addFuzzySet(T320);
FuzzySet* T300 = new FuzzySet(31.8,33.8,35.8,37.8);
retardo->addFuzzySet(T300);
FuzzySet* T280 = new FuzzySet(36.3,38.3,40.3,42.8);
retardo->addFuzzySet(T280);
FuzzySet* T260 = new FuzzySet(40.6,43.1,46.1,48.6);
retardo->addFuzzySet(T260);
FuzzySet* T240 = new FuzzySet(46.9,49.9,51.9,56.9);
retardo->addFuzzySet(T240);
FuzzySet* T220 = new FuzzySet(52.4,55.4,61.4,65.4);
retardo->addFuzzySet(T220);
FuzzySet* T200 = new FuzzySet(62.4,65.4,69.4,78.4);
retardo->addFuzzySet(T200);
FuzzySet* T180 = new FuzzySet(70.6,75.6,81.6,91.6);
retardo->addFuzzySet(T180);
FuzzySet* T160 = new FuzzySet(82.6,89.7,95.7,110.7);
retardo->addFuzzySet(T160);
FuzzySet* T140 = new FuzzySet(96.7,104.1,118.1,133.0);
retardo->addFuzzySet(T140);
FuzzySet* T120 = new FuzzySet(120.1,131.0,161.6,161.6);
retardo->addFuzzySet(T120);

fuzzy->addFuzzyOutput(retardo);

//Ensamble de las reglas difusas

//Regla: "Si velocidad = V120 ENTONCES retardo = T120"

```

```

FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV120 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV120->joinSingle(V120); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT120 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT120->addOutput(T120); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla01 = new FuzzyRule(1, siVelocidadV120, entoncesRetardoT120); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla01); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI velocidad = V140 ENTONCES retardo = T140"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV140 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV140->joinSingle(V140); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT140 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT140->addOutput(T140); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla02 = new FuzzyRule(2, siVelocidadV140, entoncesRetardoT140); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla02); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI velocidad = V160 ENTONCES retardo = T160"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV160 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV160->joinSingle(V160); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT160 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT160->addOutput(T160); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla03 = new FuzzyRule(3, siVelocidadV160, entoncesRetardoT160); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla03); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI velocidad = V180 ENTONCES retardo = T180"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV180 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV180->joinSingle(V180); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT180 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT180->addOutput(T180); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla04 = new FuzzyRule(4, siVelocidadV180, entoncesRetardoT180); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla04); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI velocidad = V200 ENTONCES retardo = T200"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV200 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV200->joinSingle(V200); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT200 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT200->addOutput(T200); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla05 = new FuzzyRule(5, siVelocidadV200, entoncesRetardoT200); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla05); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

```

```

//Regla: "SI velocidad = V220 ENTONCES retardo = T220"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV220 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV220->joinSingle(V220); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT220 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT220->addOutput(T220); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla06 = new FuzzyRule(6, siVelocidadV220, entoncesRetardoT220); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla06); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI velocidad = V240 ENTONCES retardo = T240"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV240 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV240->joinSingle(V240); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT240 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT240->addOutput(T240); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla07 = new FuzzyRule(7, siVelocidadV240, entoncesRetardoT240); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla07); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI velocidad = V260 ENTONCES retardo = T260"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV260 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV260->joinSingle(V260); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT260 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT260->addOutput(T260); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla08 = new FuzzyRule(8, siVelocidadV260, entoncesRetardoT260); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla08); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI velocidad = V280 ENTONCES retardo = T280"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV280 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV280->joinSingle(V280); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT280 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT280->addOutput(T280); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla09 = new FuzzyRule(9, siVelocidadV280, entoncesRetardoT280); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla09); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI velocidad = V300 ENTONCES retardo = T300"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV300 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV300->joinSingle(V300); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT300 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT300->addOutput(T300); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla10 = new FuzzyRule(10, siVelocidadV300, entoncesRetardoT300); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla10); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

```

```

//Regla: "SI velocidad = V320 ENTONCES retardo = T320"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV320 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV320->joinSingle(V320); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT320 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT320->addOutput(T320); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla11 = new FuzzyRule(11, siVelocidadV320, entoncesRetardoT320); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla11); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI velocidad = V340 ENTONCES retardo = T340"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV340 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV340->joinSingle(V340); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT340 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT340->addOutput(T340); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla12 = new FuzzyRule(12, siVelocidadV340, entoncesRetardoT340); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla12); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//Regla: "SI velocidad = V360 ENTONCES retardo = T360"
FuzzyRuleAntecedent* siVelocidadV360 = new FuzzyRuleAntecedent(); // Antecedente a expresión
siVelocidadV360->joinSingle(V360); // Se añade la correspondiente función de membresía al
antecedente
FuzzyRuleConsequent* entoncesRetardoT360 = new FuzzyRuleConsequent(); // Consecuencia a
expresión
entoncesRetardoT360->addOutput(T360); // Se añade la correspondiente función de membresía a la
consecuencia
// Inicialización de la regla difusa
FuzzyRule* regla13 = new FuzzyRule(13, siVelocidadV360, entoncesRetardoT360); // Se pasa el
antecedente y la consecuencia a una expresión
fuzzy->addFuzzyRule(regla13); // Se añade la regla difusa como un objeto difuso

//declaración de I/O
pinMode(steps, OUTPUT);
pinMode(reset, OUTPUT);
pinMode(flag_s, INPUT);
pinMode(flag_m, INPUT);
digitalWrite(reset, LOW); //Mientras reset este en LOW el motor permanecerá apagado y no sufrirá.
El chip apagará todos los puertos y no leerá comandos.
}

void loop() {
if(digitalRead(flag_m)==HIGH && digitalRead(flag_s)==LOW){
//Ingreso del dato al controlador difuso
if(vel>=10){
fuzzy->setInput(1,vel);
//Fusificación
fuzzy->fuzzify();
//Defusificación
tiempo=fuzzy->defuzzify(1);
delay(100);
if(vel<=110){
tiempo=31960*pow(vel,-1.108)-22.78;
}
}
Serial.println(vel);
Serial.println(tiempo);
}
}

```

```

Serial.println();
Serial.println("Se está ejecutando fi fi fi fi...");
digitalWrite(reset, HIGH);
while(digitalRead(flag_m)==HIGH && digitalRead(flag_s)==LOW){
  if(t>tiempo){
    t=t-0.001;
  }
  digitalWrite(steps, HIGH);
  digitalWrite(steps, LOW); // A4988 avanza una vez por cada pulso de energía.
  delayMicroseconds(t); // Regula la velocidad, cuanto más bajo más velocidad.
}
}
if(vel<10){
  digitalWrite(reset, LOW);
}
}

if(digitalRead(flag_m)==LOW && digitalRead(flag_s)==HIGH){
  //Serial.println("lectura");
  digitalWrite(reset, LOW);
  Wire.requestFrom(1,3);
  while (Wire.available()) {
    dato=Wire.read();
    updateStr(dato);
  }
  Wire.endTransmission();
  vel=atoi(datoAct);
  datoAct[0]='\0';
  datoLen=0;
  if(vel>370){
    vel=370;
  }
  if (vel<10){
    vel=0;
  }
}

if(digitalRead(flag_m)==LOW && digitalRead(flag_s)==LOW){
  //Serial.println("reset175");
  t=175;
  digitalWrite(reset, LOW);
}

if(digitalRead(flag_m)==HIGH && digitalRead(flag_s)==HIGH){
  Serial.println("resetr");
  digitalWrite(reset, LOW);
}
}

void updateStr(int val){
  if(datoLen<3){
    datoAct[datoLen]=val;
    datoAct[datoLen+1]='\0';
    datoLen++;
  }
  else{
    datoAct[0]='\0';
    datoLen=0;
  }
}
}

```

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA HOT-PLATE PARA EL PROCESAMIENTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS, UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA, DESTINADA A BIOTECNOLOGÍA”

Elaborado por:

LOACHAMÍN IZA HENRY DAVID

ÑAUÑAY PUENTE DIEGO FERNANDO

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
ING. FRANCISCO TERNEUS