



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL” bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- **Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.**
- **Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.**
- **No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.**

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL DE TEMPERATURA EN UN
ENTORNO LÍQUIDO, PARA VERIFICAR EL CORRECTO
FUNCIONAMIENTO DE SENSORES DE TEMPERATURA, POR EL
MÉTODO DE COMPARACIÓN.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

FLAVIO IVAN LLUGSI CAÑAR
fluvivan@yahoo.com

DIRECTOR: MSC. YADIRA BRAVO N.
Yadira.bravo@epn.edu.ec

Quito, Julio 2015

DECLARACIÓN

Yo, Flavio Ivan Llugsí Cañar, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Flavio Ivan Llugsí Cañar

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Flavio Ivan Llugsí Cañar, bajo mi supervisión.

**MSC. YADIRA BRAVO N.
DIRECTOR DEL PROYECTO**

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Msc. Yadira Bravo por permitirse ayudarme en este proceso, por la paciencia y el apoyo en todo, a mis padres que han sabido tener respeto y confianza en todas las actividades que he realizado en mi vida, por todo el apoyo, por todo el amor que he recibido de ellos.

A mis hermanos; su honestidad, trabajo e inteligencia, han sido mi guía y ejemplo en todo momento.

A mi novia Dianita, tú has sido la que has visto crecer este proyecto desde la idea hasta la realización, como nadie más, escuchaste todos los días, cada cosa que hacía, cada avance y te agradezco mucho.

A mis amigos de la universidad, con los que compartimos penas y alegrías, cumpleaños, exámenes finales y resultados, proyectos, pases y repeticiones.

A mis estudiantes y compañeros del Colegio Don Bosco, cada día desde que comencé a enseñar, he aprendido más.

Y a mi Dios, Jesucristo maestro y hermano, que nos has brindado la protección de tu madre, nuestra madre del cielo, nuestra auxiliadora...

DEDICATORIA

Sin dudar un solo instante
dedico éste proyecto,
y todos los proyectos
que me proponga en mi vida,
a mi familia.

CONTENIDO

CARÁTULA.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
CERTIFICACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
CONTENIDO.....	vi
INDICE DE GRÁFICOS.....	xi
INDICE DE TABLAS.....	xv
RESUMEN.....	xvii
PRESENTACIÓN.....	xviii
CAPÍTULO 1.....	1
MARCO TEÓRIO.....	1
1.1. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	1
1.1.1. La materia y sus diferentes estados.....	1
1.1.2. Comportamiento molecular y la energía calórica.....	1
1.1.3. Cambios de estado de los materiales.....	2
1.1.4. Primer principio de la termodinámica y el calor	2
1.1.5. Calor Específico.....	3
1.1.6. Segunda ley de la termodinámica.....	3
1.1.7. Modos de transferencia de calor.....	3
1.1.7.1. <i>Por conducción</i>	3
1.1.7.2. <i>Por convección</i>	4
1.1.7.3. <i>Por radiación</i>	5
1.1.8. Diagrama de presión entalpía.....	5
1.1.8.1. <i>Vapor saturado</i>	7
1.1.8.2. <i>Vapor recalentado</i>	7
1.1.8.3. <i>Líquido saturado</i>	7
1.1.8.4. <i>Líquido subenfriado</i>	7
1.1.8.5. <i>Mezcla Líquido Vapor</i>	7

1.1.9. Partes del sistema de refrigeración.....	7
1.1.10. Proceso de refrigeración.....	8
1.2. SISTEMA DE ELEVACIÓN DE TEMPERATURA.....	10
1.2.1. Calentador por circulación de vapor.....	10
1.2.2. Calentador por circulación de corriente.....	11
1.2.2.1. Principio de elevación de temperatura en un conductor.....	11
1.2.2.2. Conductor de titanio.....	15
1.3. SISTEMA DE DETECCIÓN DE TEMPERATURA.....	16
1.3.1. Sensores de temperatura.....	16
1.3.1.1. RTD o termoresistencia.....	17
1.3.1.2. Termistor.....	17
1.3.1.3. Termocupla.....	17
1.3.2. Transmisor de temperatura.....	19
1.3.2.1. MAX31855T.....	19
1.3.2.2. Comunicación SPI.....	21
CAPÍTULO 2.....	24
DESARROLLO DEL HARDWARE DEL SISTEMA.....	24
2.1. ESTRUCTURA DE REFRIGERAIÓN DE LA PLANTA.....	24
2.2. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	26
2.2.1. Compresor.....	26
2.2.2. Refrigerante.....	28
2.2.3. Condensador.....	29
2.2.4. Ventilador.....	30
2.2.5. Evaporador.....	31
2.3. AGITADOR.....	32
2.4. CALENTADOR.....	33
2.5. ELEMENTOS DE CONTROL DE LA PLANTA.....	33
2.5.1. Pulsadores de control.....	33
2.5.2. Indicadores.....	35
2.5.3. Pantalla indicadora LCD.....	36
2.5.4. Transmisor de temperatura.....	39

2.5.5. Entrada analógica de calibración.....	41
2.5.6. Relé de activación de calentador y de sistema de refrigeración.....	42
2.5.7. Relé para el encendido del sistema de refrigeración.....	45
2.6. CONEXIÓN DE ELEMENTOS DE LA PLANTA.....	46
CAPÍTULO 3.....	59
DISEÑO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA.....	59
3.1. ELEMENTO DE CONTROL ATMEGA164P.....	59
3.1.1. Análisis de entradas y salidas.....	60
3.1.2. Familia AVR.....	61
3.1.3. Lenguaje de programación de los microcontroladores atmega.....	61
3.1.3.1. <i>Lenguaje de BASCOM</i>	61
3.1.3.2. <i>Lenguaje C++</i>	62
3.1.3.3. <i>Assembler</i>	62
3.2. DIAGRAMA DE FLUJO.....	62
3.2.1. Definición de librerías.....	64
3.2.2. Definición de variables.....	65
3.2.3. Proceso de activación de acciones.....	65
3.2.4. Adquisición de datos desde MAX31855 a ATMEGA164P por comunicación SPI.....	66
3.2.5. Compensación de la junta.....	70
3.2.6. Calibración de temperatura mayor que cero.....	70
3.2.7. Calibración de temperatura menor que cero.....	76
3.2.8. Control de la planta.....	76
3.2.9. Interrupciones internas y externas.....	78
CAPÍTULO 4.....	83
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	83
4.1. PRUEBAS DE TIEMPO DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO DEL LÍQUIDO CONTROLADO DENTRO DE EL ENVASE.....	83
4.1.1. Calentamiento de la planta sin sistema calentador en el tiempo.....	83
4.1.2. Enfriamiento de la planta sin sistema de refrigeración en el tiempo.....	85
4.1.3. Calentamiento de la planta con sistema calentador.....	86

4.1.4. Enfriamiento de la planta con sistema de refrigeración.....	88
4.2. PRUEBAS DE LECTURA DEL SENSOR DE TEMPERATURA.....	90
4.3. PRUEBAS DE ESTABILIDAD EN LA LECTURA DEL SENSOR.....	92
4.4. PRUEBAS DE TIEMPO DE RESPUESTA A LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL TERMOPAR.....	95
4.5. PRUEBAS PARA EL CÁLCULO DE LA PENDIENTE DE CORRECCIÓN EN LA MEDIDA.....	102
4.6. CONTROL DE ESTABILIDAD EN LA TEMPERATURA DE LA JUNTURA.....	107
4.7. CORRIENTE DE ARRANQUE DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	112
4.8. PRUEBA DE PRESICIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA PLANTA.....	114
CAPÍTULO 5.....	121
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	121
5.1. CONCLUSIONES.....	121
5.2. REOMENDACIONES.....	123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
ANEXOS.....	127
ANEXO A.....	128
MANUAL DEL USUARIO.....	128
PLANTA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA.....	128
1. DESCRIPCIÓN.....	129
2. APLICACIÓN.....	129
3. MODO DE CONTROL.....	129
4. DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL.....	130
5. SEGURIDAD.....	137
6. MANTENIMIENTO.....	137
7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	138
ANEXO B.....	139
ANÁLISIS DE COSTOS.....	139
ANEXO C.....	140
TRANSMISOR DE TEMPERATURA MAX31855.....	140
ANEXO D.....	153

PROGRAMA DE LA PLANTA EN LENGUAJE C++ CON ATMEL STUDIO.....	153
ANEXO E.....	159
DIAGRAMA DE CONEXIONES DE LA PLACA DE CONTROL.....	159
ANEXO F.....	160
DISEÑO DE LA PLACA DE CONTROL.....	160
ANEXO G.....	161
PLACA DE CONTROL REALIZADA.....	161
ANEXO H.....	162
NUMERACIÓN DE CONDUCTORES DEL EQUIPO.....	162
ANEXO I.....	163
DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DE LA PLANTA.....	163

INDICE DE GRÁFICOS

Figura 1.1. Ejemplo de diagrama presión entalpía.....	6
Figura 1.2. Sistema de Refrigeración Convencional.....	8
Figura 1.3. Calentador por Circulación de Vapor.....	11
Figura 1.4. Forma exponencial en la elevación de temperatura de un conductor con respecto al tiempo.....	15
Figura 1.5. Calentador por Circulación de Electricidad en Titanio.....	15
Figura 1.6. Calentador Eléctrico de Titanio.....	16
Figura 1.7. Diagrama de Bloques MAX31855 y Microcontrolador.....	20
Figura 1.8. Protocolo de Funcionamiento SPI en el MAX31855.....	20
Figura 1.9. Diagrama de Bloques de Comunicación SPI.....	23
Figura 2.1. Imagen Vista frontal Y Vista Posterior.....	25
Figura 2.2. Imágenes Vista Lateral 1.....	24
Figura 2.3. Imagen Vista Lateral 2.....	25
Figura 2.4. Imagen Vista Superior.....	25
Figura 2.5. Modelo de Compresor Escogido.....	27
Figura 2.6. Compresor Instalado en la Planta.....	27
Figura 2.7. Código NFPA del refrigerante R134a.....	28
Figura 2.8. Condensador Instalado en la Planta.....	29
Figura 2.9. Modelo de Ventilador Utilizado.....	30
Figura 2.10. Ventilador Instalado en la Planta.....	31
Figura 2.11. Evaporador Instalado en la Planta.....	31
Figura 2.12. Serpentín del Evaporador instalado en el Envase.....	32
Figura 2.13. Agitador Instalado.....	32
Figura 2.14. Calentador Instalado.....	33
Figura 2.15. Pulsadores de Control y Pines Correspondientes.....	34
Figura 2.16. Matriz de pulsadores conectados a la placa de control.....	34
Figura 2.17. Indicadores y Pines correspondientes.....	35
Figura 2.18. Matriz de LEDs conectados a la caja de control.....	36
Figura 2.19. LCD y puerto de control.....	37
Figura 2.20. Conexión LCD y placa de control mediante conductores tipo bus.....	38

Figura 2.21. Matriz de LEDs, Pulsadores y LCD empotrados a la Caja de Control...	38
Figura 2.22. Conexión Placa de control y Matrices.....	39
Figura 2.23. Conexión Transmisor de temperatura y Puerto utilizado.....	40
Figura 2.24. Transmisor de temperatura Usado en el Proyecto.....	40
Figura 2.25. Transmisor de temperatura Instalado en la Placa de Control.....	41
Figura 2.26. Entrada Analógica Para Calibración.....	41
Figura 2.27. Diagrama Eléctrico Relé de Estado Sólido.....	43
Figura 2.28. Relé de control instalado en la planta.....	43
Figura 2.29. Conexión Inicial para encendido del Sistema de Refrigeración.....	44
Figura 2.30. Conexión final para encendido del Sistema de Refrigeración.....	45
Figura 2.31. Relé Electromagnético y sócalo para encendido del Sistema de Refrigeración.....	46
Figura 2.32. Diagrama de Bloques de la conexión de todo el sistema.....	47
Figura 2.33. Bloque de Control.....	49
Figura 2.34. Superficie Plástica donde se coloca la Placa de Control.....	49
Figura 2.35. Superficie Plástica con la placa de control Conectada.....	50
Figura 2.36. Bloque de la Caja de Control.....	50
Figura 2.37. Caja de Control.....	51
Figura 2.38. Conexión desde la Caja de Control hasta la Caja de relés a través de Maguera.....	51
Figura 2.39. Circuito de Control del Bloque de Relés.....	52
Figura 2.40. Imagen de conexión del Bloque de Relés.....	53
Figura 2.41. Circuito de control Bloque de Relés Ramal 1.....	54
Figura 2.42. Imagen de conexión del Bloque de Relés.....	55
Figura 2.43. Imagen de conexión del Bloque de Relés.....	56
Figura 2.44. Fuentes de corriente continua conectadas en la Planta.....	57
Figura 3.1. Diagrama de pines Microcontrolador Atmega164p.....	59
Figura 3.2. Diagrama de flujo principal del programa.....	63
Figura 3.3. Diagrama de Flujo de Activación de Acciones.....	66
Figura 3.4. Diagrama de flujo de la adquisición de datos desde MAX31855 al Atmega164p por comunicación SPI.....	67

Figura 3.5. Diagrama de flujo de la calibración de temperatura mayor que cero.....	72
Figura 3.6. Temperatura Patrón vs Temperatura de Sensor.....	74
Figura 3.7. Temperatura de Sensor vs error.....	74
Figura 3.8. Diagrama de Flujo del Control de la Planta.....	77
Figura 3.9. Interrupción Externa INT0.....	78
Figura 3.10. Interrupción externa INT1.....	79
Figura 3.11. Diagrama de flujo de uso Timer.....	81
Figura 3.12. Uso del conversor Análogo Digital.....	82
Figura 4.1. Temp Vs Tiempo, de calentamiento sin sistema calentador en la planta.....	84
Figura 4.2. Temp Vs Tiempo, enfriamiento de la planta sin sistema de refrigeración.....	86
Figura 4.3. Calentamiento de la planta con Sistema Calentador en función del tiempo...	88
Figura 4.4. Enfriamiento de la planta con Sistema de Refrigeración.....	90
Figura 4.5. Diagrama de flujo de programación de arduino para lectura del MAX31855.....	91
Figura 4.6. Grafica del error 1 en la medida del sensor de la planta con respecto al Patrón de medida.....	98
Figura 4.7. Grafica del error 2 en la medida del sensor de la planta con respecto al patrón de medida.....	101
Figura 4.8. Grafica del error 3 en la medida del sensor de la planta con respecto al Patrón de medida.....	105
Figura 4.9. Gráfica del error de medida en función de la temperatura interna del Sensor.....	108
Figura 4.10. Ventiladores instalados para extracción de gas en la planta.....	111
Figura A.1. Descripción Numérica de la Caja de Control.....	130
Figura A.2. Ventilador de Evacuación de Gas, Ventilador 3.....	133
Figura A.3. Ventilador de Evacuación de Gas, Ventilador 4.....	134
Figura A.4. Descripción Numérica de Controles de la Planta.....	135
Figura A.5. Descripción Numérica, Elementos Posteriores de la Planta.....	136
Figura E.1. Diagrama de Conexiones de la Placa de Control.....	159
Figura F.1. Diseño de Placa de Control.....	160
Figura G.1. Placa de Control Realizada.....	161

Figura H.1. Numeración de Conductores en la Placa.....	162
Figura I.1. Dimensiones Vista Frontal.....	163
Figura I.2. Dimensiones Vista Posterior.....	164
Figura I.3. Dimensiones Vista Lateral 1.....	164
Figura I.4. Dimensiones Vista lateral 2.....	165
Figura I.5. Dimensiones Vista Superior.....	165

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Cambios de estado de los Materiales.....	2
Tabla 1.2. Termopares Normados y Sus Características.....	19
Tabla 1.3. Mapa de Datos del MAX31855.....	21
Tabla 1.4. Ejemplo de datos de obtención de Temperatura.....	21
Tabla 1.5. Líneas de Función en comunicación SPI.....	22
Tabla 2.1. Catálogo de Motores para Refrigeración Industrial.....	26
Tabla 2.2. Características Fisicoquímicas del Gas Refrigerante R134a.....	29
Tabla 2.3. Características de Relé Electromagnético.....	45
Tabla 3.1. Categorías de microcontroladores de la familia AVR.....	60
Tabla 3.2. Categorías de microcontroladores de la familia AVR.....	61
Tabla 3.3. Mapa de Datos del MAX31855.....	69
Tabla 4.1. Valores Temp Vs Tiempo, de calentamiento sin sistema calentador en la Planta.....	84
Tabla 4.2. Temp Vs Tiempo, enfriamiento de la planta sin sistema de refrigeración.....	85
Tabla 4.3. Calentamiento de la Planta con Sistema Calentador en función del tiempo.....	86
Tabla 4.4. Enfriamiento de la planta con Sistema de Refrigeración.....	88
Tabla 4.5. Contrastación de valores entre referencia y sensor del proyecto.....	93
Tabla 4.6. Tabla comparativa 1, entre sensor del proyecto y patrón de medida.....	96
Tabla 4.7. Tabla comparativa 2, entre sensor del proyecto y patrón de medida.....	98
Tabla 4.8. Tiempo de respuesta al cambio de temperatura del Termopar.....	102
Tabla 4.9. Tabla comparativa 3, entre sensor del proyecto y patrón de medida.....	103
Tabla 4.10. Tabla comparativa 4, entre sensor del proyecto y patrón de medida con Diferencia entre el uno y otro.....	104
Tabla 4.11. Tabla comparativa 5, entre sensor del proyecto y patrón de medida con Error obtenido.....	105
Tabla 4.12. Tabla comparativa 6, entre sensor del proyecto y patrón de medida con Error obtenido.....	106
Tabla 4.13. Tabla comparativa 7, entre sensor del proyecto y patrón de medida con Error obtenido.....	106

Tabla 4.14. Tabla comparativa 1, Temperatura de la junta fría Vs Tiempo.....	108
Tabla 4.15. Tabla comparativa 2, Temperatura de la junta fría Vs Tiempo.....	109
Tabla 4.16. Tabla comparativa 3, Temperatura de la junta fría Vs Tiempo.....	110
Tabla 4.17. Corriente de arranque en función de la Potencia Nominal del Motor....	113
Tabla 4.18. Pruebas de contrastación entre valor de temperatura del sensor de la Planta y el sensor patrón de medida.....	115
Tabla 4.19. Resultados obtenidos de muestras de medidas.....	117
Tabla 4.20. Errores de la planta.....	119
Tabla 4.21. Tabla de errores sistemáticos debido al uso de termopares como Referencia NIST250-35.....	120
Tabla A.1. Especificaciones Técnicas de la Planta.....	138
Tabla B.1. Análisis de Costos.....	139

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad, crear un sistema unificado de refrigeración y de calentamiento de un entorno líquido, llamado etilenglicol, el sistema conseguirá que la temperatura de dicho líquido varíe desde los -10°C hasta los 120°C , para con ésta acción, poder realizar la comprobación del correcto funcionamiento de sensores de temperatura en la industria.

Para poder obtener el fin deseado, el proyecto se divide básicamente en tres partes importantes, que trabajan en conjunto; la primera parte es el sistema de refrigeración del líquido, en la segunda parte se estaría hablando de encontrar el modo de calentar el líquido, y finalmente para obtener un correcto funcionamiento del equipo, se tendría el sensor usado como patrón de medida, para ver la temperatura en cada momento y determinar si se debe hacer una acción de calentamiento o de enfriamiento.

El sistema de refrigeración, es el sistema convencional usado en casi todos los equipos de refrigeración, es decir el conjunto de elementos, que son el evaporador, el compresor, el condensador, y con un gas llamado comúnmente refrigerante, que realizan el proceso deseado sobre el líquido para el control de temperatura.

Para poder variar la temperatura del etilenglicol a valores superiores a la temperatura ambiente, se planea usar una termo resistencia de titanio que se debe encontrar sumergida en el etilenglicol.

Finalmente para conocer la temperatura del sistema en todo momento se planea usar un transmisor de temperatura, especial, el cual toma el dato de la temperatura de un termopar, y lo transforma a un valor digital, el cual es enviado por comunicación SPI, hasta un microcontrolador, para realizar las acciones específicas deseadas que serán explicadas a medida que avanza el proyecto.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto se divide en cinco capítulos los cuales serán explicados a continuación.

El capítulo uno es el marco teórico del proyecto, en el cual de una manera clara se busca, dar una explicación de los principios básicos de funcionamiento de las diferentes partes de la planta, en base a sus principios, físicos, químicos, y fundamentos matemáticos.

El segundo capítulo es el desarrollo e implementación del hardware del sistema, en este capítulo se explicará, como se colocaron las partes principales del sistema, como se ubicaron los elementos electrónicos, de control, los elementos de potencia y sus respectivas protecciones.

El tercer capítulo habla del software, es el capítulo donde mediante diagramas de flujo y explicaciones precisas, se dará a conocer el programa realizado, para controlar las salidas del microcontrolador, y sus respectivas entradas, tanto para la variación de temperatura como para generar mecanismo de seguridad hacia el sistema.

El capítulo referente a las pruebas y los resultados, será el cuarto capítulo, como su nombre ya lo dice, se verificará el correcto funcionamiento de todo el sistema, y se indicarán dichos resultados.

El ultimo capítulo inherente al capítulo cinco son las conclusiones y recomendaciones resultantes del proyecto realizado.

CAPÍTULO 1.

MARCO TEÓRICO

1.1. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Para entender correctamente el sistema de refrigeración, se comenzará explicando ciertos fundamentos físicos, referidos al calor, temperatura, y principios de la termodinámica, para después explicar en detalle las partes principales de un sistema de refrigeración.

1.1.1. LA MATERIA Y SUS DIFERENTES ESTADOS

Como es conocido, la materia tiene tres estados o formas físicas fundamentales, el estado líquido, sólido, y gaseoso, pero a más de éste conocimiento básico se debe conocer el comportamiento de las moléculas, en cada estado.

- En el estado sólido las moléculas de una materia conservan constantes, su forma, su cantidad, y dimensiones.
- En el estado líquido las moléculas de una materia determinada, conservarán sus dimensiones y cantidad, mas no su forma.
- Finalmente en el estado gaseoso, las moléculas no mantendrán condiciones constantes como en los casos anteriores, ni de forma, cantidad o dimensiones.

1.1.2. COMPORTAMIENTO MOLECULAR Y LA ENERGÍA CALÓRICA

En el tema anterior se habló de las moléculas como parte de la materia, y como se encuentran en dicha materia en determinados casos, en este tema se habla en cambio del efecto que se tiene en las moléculas en presencia de energía calórica.

Cuando se entrega calor a una materia, las moléculas de ésta, sufrirán un aumento en su velocidad de desplazamiento, y con esto aumentará la temperatura.

Mientras que en el caso de retirar temperatura de un cuerpo, el efecto es inverso es decir las moléculas disminuyen la velocidad de desplazamiento, y la temperatura.

1.1.3. CAMBIOS DE ESTADO DE LOS MATERIALES

Puesto que para el estudio y construcción del sistema de refrigeración, se tienen cambios de estado del líquido refrigerante, que es el que realiza el cambio de energía calórica entre el entorno líquido y el ambiente, se debe tener en cuenta ciertos términos de estos cambios.

Tabla 1.1. Cambios de estado de los Materiales

Transición	Nombre
Sólido a Gas	Sublimación
Gas a Sólido	Sublimación Regresiva
Gas a Líquido	Licuación o Condensación
Líquido a Gas	Vaporización
Líquido a Sólido	Solidificación
Sólido a Líquido	Fusión

1.1.4. PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA Y EL CALOR

Es importante tener un correcto entendimiento del calor, puesto que en muchas ocasiones incluso se usa este término solo para temperaturas elevadas, y para temperaturas bajas se usa el término frío.

Se tiene tres ideas principales acerca del principio de la termodinámica, la primera idea expone que todo material tiene una energía interna, la segunda idea plantea la conservación de energía, es decir que la energía de un material, si esta está aislada no se pierde, y en su defecto la materia se podrá transformar, pero no creará ni perderá energía.

La tercera idea nos habla acerca del calor, y se refiere al calor como una energía transitoria o de transito que se da entre dos cuerpos desde el cuerpo con mayor temperatura hacia otro de menor, hasta que los dos tengan o lleguen al equilibrio térmico.

1.1.5. CALOR ESPECÍFICO

Se define como la cantidad de calor necesario, para aumentar cierta cantidad de temperatura a un cuerpo de una dimensión o volumen determinado.

La unidad de medida puede ser la caloría o el joule.

Si se está hablando de una medida en joule, se dice que se necesita de un joule para aumentar 1°K de temperatura de una sustancia de 1Kg, mientras que en caloría se define, que se necesita 1 cal, para elevar 1°C de una sustancia de 1g.

1.1.6. SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La segunda ley explica básicamente que el trabajo neto realizado por un sistema puede generar proporcionalmente una cantidad de calor, y que dicho calor como un complemento de la primera ley de la termodinámica, se traslada de un material de mayor temperatura a otro de menor temperatura.

1.1.7. MODOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

1.1.7.1. Por Conducción

Se dice que hay una transferencia de calor entre dos materiales cuando estos se encuentran en contacto directo, siempre del material de mayor temperatura, al de menor temperatura, en el caso de existir, un elemento sólido el cual en el momento de que en sus extremos tenga una diferencia de temperatura, el calor se moverá en todo el elemento hasta que se tenga una temperatura resultante uniforme, como poner una varilla en una llama.

Ahora se puede suponer que esta misma varilla caliente es sumergida dentro de agua muy fría entonces el calor de la varilla será transferido al agua, pero este fenómeno no es inmediato, la varilla tendrá un calor mayor en su centro o parte interna, mientras que la parte externa que está en contacto con el agua fría, se encontrará a una temperatura menor, en ese momento la temperatura trata de equilibrarse en todo el

cuerpo mientras sigue transfiriendo calor al exterior, hasta que la temperatura de toda la varilla sea igual a la temperatura del agua.

La velocidad con la que el calor es transferido de un material a otro, depende de tres factores fundamentales como son, el volumen de los materiales en contacto, la diferencia de temperatura entre los dos elementos, y la conductividad térmica.

La conductividad térmica es la cantidad a la cual calor fluye a través de un material y está dado en los términos presentados en la ecuación 1.1.

$$k = \frac{Kcal}{h \times m \times ^\circ C} \quad (1.1)$$

Kcal= Calor específico

h= Tiempo de exposición

m= Distancia

°C= Temperatura.

1.1.7.2. Por Convección

La convección es un fenómeno muy importante en los sistemas de refrigeración, es este fenómeno el que hace posible que se pueda tener una cierta uniformidad de la temperatura dentro en todo un fluido en un determinado lugar.

Supóngase que en un medio cerrado como una habitación se tiene una temperatura determinada, luego se coloca otro elemento que puede ser un serpentín en la parte superior de la habitación, con un gas en su interior el cual circula y tiene menor temperatura que el aire en la habitación, por el fenómeno de conducción este serpentín absorberá energía calórica de la habitación, haciendo que el aire más cercano a él tenga menor temperatura, este aire se vuelve más denso, y comienza a bajar al fondo de la habitación, en este momento el aire que comienza a bajar también comienza a tener, una transferencia de energía calórica con el aire más caliente en la parte inferior de la habitación, esta transferencia se dará hasta que la temperatura en el entorno sea

constante en todo su espacio, este fenómeno del movimiento de un elemento por la diferencia de temperatura existente en un entorno, se conoce como convección.

1.1.7.3. Por radiación

Se conoce a la radiación como la energía que emite un material que se encuentra a una temperatura finita, este material puede ser sólido, líquido o gaseoso. La radiación puede darse por los cambios de las configuraciones electrónicas de las moléculas o átomos que constituyen un determinado elemento. La energía producida por la radiación, viaja y es transportada por fotones u ondas electromagnéticas.

A diferencia de la transferencia de calor por convección o conducción, que necesita de un medio material, esta transferencia de radiación es más efectiva en el vacío. La capacidad de un cuerpo de generar radiación, es la denominada potencia emisiva superficial, y básicamente es el porcentaje de potencia emisiva superficial que tiene un cuerpo negro o radiador ideal, a una cierta temperatura.

Este porcentaje o fracción de potencia emisiva superficial de un cuerpo negro, que tienen todos los materiales, es la denominada emisividad.

La velocidad a la que la radiación de un cuerpo incide en una superficie se conoce como la irradiación.

En el momento que un cuerpo es irradiado su energía térmica aumentará, la capacidad de un cuerpo de absorber la radiación de una fuente es la absorptividad, y depende de muchos factores siendo el principal, el color de la superficie irradiada.

1.1.8. DIAGRAMA PRESIÓN ENTALPÍA

Para saber que refrigerante usar en un determinado momento, dependiendo de sus características específicas se pueden realizar muchas pruebas, pero una de las mejores y más fáciles formas es el uso del diagrama de presión vs entalpía, el cual

nos indicará, en qué estado se encontrará el refrigerante a una temperatura y una presión determinada.

El diagrama de presión entalpía, nos muestra el ciclo de refrigeración, se denomina a la entalpía como el calor específico de alguna sustancia a partir de un punto inicial, y en el diagrama ésta temperatura es comparada con la presión que tiene dicha sustancia en ese preciso momento. Para cualquier sustancia el diagrama presión entalpía es similar en forma, mas no en valores de presión y entalpía, estos valores son dependientes de cada sustancia.

El diagrama presión entalpía, indicará los valores de presión en el lado izquierdo del grafico en forma vertical, y la entalpía se colocará en la parte inferior del grafico en forma horizontal.

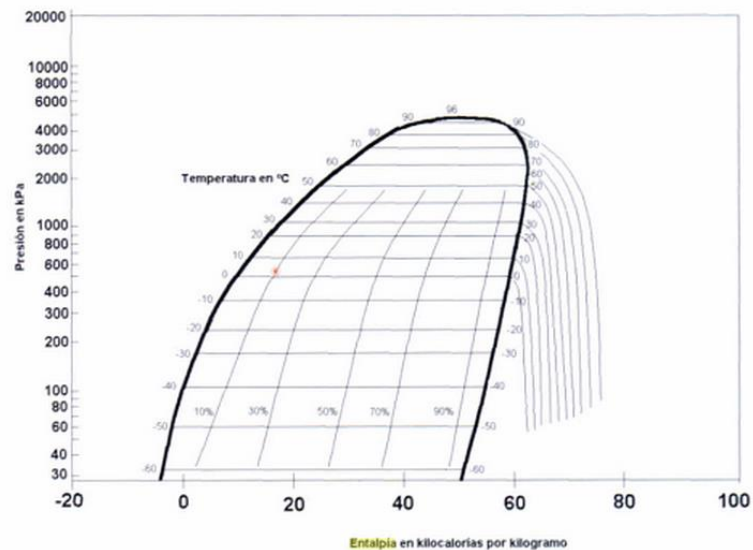


Figura 1.1. Ejemplo de diagrama Presión Entalpía [1]

Existen cinco zonas importantes en el diagrama, las cuales están representadas a partir de la curva en forma de herradura que se dibuja en la Figura 1.1. Dichas zonas serán explicadas a continuación.

1.1.8.1.Vapor Saturado.

Se puede suponer un recipiente en el que existe la misma cantidad de líquido y de vapor, en ese momento por aumento de temperatura por ejemplo, el líquido existente se convierte en vapor, cuando esto ha ocurrido se tiene un vapor saturado, y está identificado a la derecha de la herradura, del diagrama presión entalpía.

1.1.8.2.Vapor Recalentado

Tomando el caso anterior donde toda la sustancia se encuentra en vapor, si en ese momento se transfiere más energía calórica, si bien aumenta la temperatura del medio, no existe cambio de estado de la sustancia y sigue siendo vapor, a esto se le conoce como vapor recalentado, y se encuentra representado de igual manera en la zona de la derecha de la herradura.

1.1.8.3.Líquido Saturado

Se denomina al suceso en el cual un líquido se encuentra en un punto extremo a punto de hervir, o convertirse en vapor. Se encuentra a la izquierda de la herradura.

1.1.8.4.Líquido Subenfriado

Cuando la sustancia en forma de líquido se encuentra a una temperatura menor a la del líquido saturado antes mencionado, se encuentra a la izquierda de la herradura.

1.1.8.5.Mezcla Líquido Vapor

La sustancia tratada no puede ser distinguida en un solo estado, es decir no se puede afirmar que es líquido o vapor, y es toda el área comprendida dentro de la herradura.

1.1.9. PARTES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Un sistema de refrigeración básico está conformado por cinco elementos principales los cuales son:

- Refrigerante

- Condensador
- Evaporador
- Válvula de expansión
- Compresor

1.1.10. PROCESO DE REFRIGERACIÓN

El proceso de refrigeración no tiene un comienzo o un final determinado, puesto que es un circuito cerrado con un proceso que se repite constantemente, como ya se menciona en el numeral anterior, existen cinco elementos principales en el sistema de refrigeración, si bien el refrigerante externamente no se ve, es el que realiza el intercambio de energía calórica con el ambiente que se encuentre, para comenzar con la explicación del proceso, nos ubicaremos en el momento en el que refrigerante está a punto de entrar por la válvula de expansión.

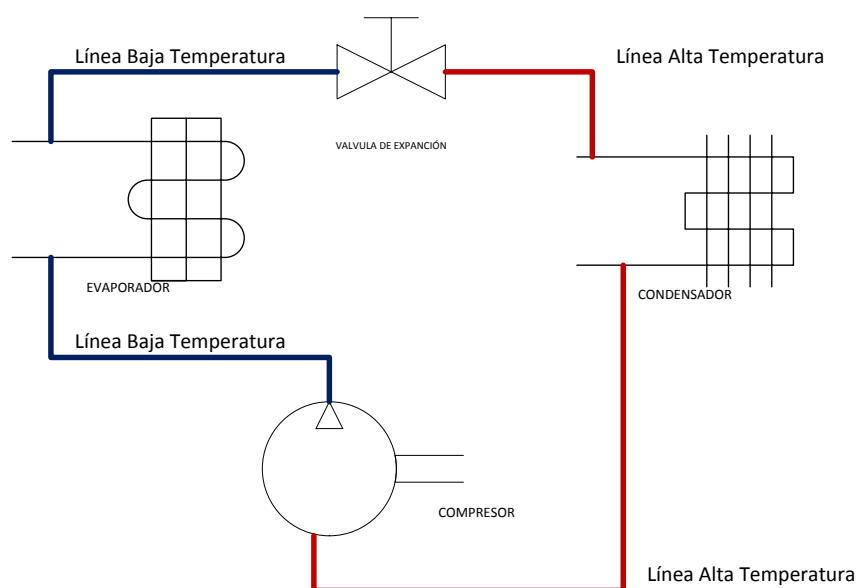


Figura 1.2. Sistema de Refrigeración Convencional

En este momento el refrigerante se encuentra en estado líquido, para dirigirse al evaporador, su paso es regulado por la válvula de expansión, en proporción a valores de presión y de temperatura deseados, en la válvula de expansión se produce una estrangulación, haciendo que la presión del refrigerante descienda del valor que tenía

a la entrada de la válvula de expansión, con respecto a la que tendrá cuando se dirija al condensador.

Cuando el refrigerante llega a baja presión al condensador, se encuentra en estado líquido y a una temperatura baja, ésta temperatura es más baja que la del entorno a refrigerar, por tanto el refrigerante absorbe energía calórica, y por esta absorción, el refrigerante comienza a evaporarse, llegando al final del serpentín del evaporador completamente en estado gaseoso y con mayor temperatura que cuando salió de la válvula de expansión, en éste momento el refrigerante ha absorbido energía calórica del entorno que se desea refrigerar, por tanto dicho entorno se encuentra a menor temperatura que al inicio.

Cuando el refrigerante se encuentra completamente en estado gaseoso, ingresa al compresor, el cual incrementa la presión del refrigerante, y por tanto incrementa su temperatura. A la salida del compresor se encuentra una válvula que impide el regreso, del refrigerante.

El refrigerante en forma gaseosa a temperatura y presión elevada, se dirige hacia el condensador donde al contacto con el medio externo que debe tener una temperatura menor a la del refrigerante en ese instante, desprende energía calórica del refrigerante disminuyendo así su temperatura, el refrigerante al encontrarse a una presión determinada, y con menor temperatura, se condensa, esto ocurrirá al final del condensador, y en ese momento llega a la válvula de expansión donde se repite todo el proceso antes mencionado.

Éste proceso es el que será utilizado en la planta del proyecto en sí, el medio a refrigerar es el Etilenglicol, por tanto el serpentín del evaporador se encontrará sumergido en el líquido, y el evaporador se encontrara un sitio determinado donde pueda eliminar la energía calórica al medio externo. Éste es el sistema usado para enfriar el líquido cuando así se desee, a continuación se procederá a explicar, el sistema usado para elevar la temperatura del líquido a controlar.

1.2. SISTEMA DE ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

Los principales métodos existentes para la elevación de temperatura tienen que ver con la circulación de vapor a alta temperatura, la circulación de agua caliente con alta presión, y la circulación de electricidad. Los métodos más eficientes para calentar un medio, es la circulación de vapor, y de líquido a presiones elevadas, pero, si se tiene una planta pequeña en la que el costo de la circulación de vapor o el líquido, supere a la planta en sí, es recomendable usar el método de circulación de electricidad.

1.2.1. CALENTADOR POR CIRCULACIÓN DE VAPOR

El vapor puede ser conducido a través de las cañerías, después de elevar la temperatura de un líquido por distintos medios los cuales pueden ser, combustibles sólidos, combustible gaseoso y la electricidad. La presión de circulación del vapor puede variar en un cierto rango permitido, y en este punto se debe tomar en cuenta que de la presión a la cual el vapor circula, depende el tiempo de duración de las cañerías, si existe una presión exagerada la vida útil de las cañerías disminuirá. Generalmente esta presión está comprendida entre 1.4 y 5Bares.

En este sistema, se debe instalar válvulas, para el control del flujo del vapor, las cuales regulan, tanto el caudal del vapor como la presión de circulación.

Cuando exista un proceso electrolítico, en el lugar donde se va a colocar las cañerías para la circulación del vapor, éstas deben ser correctamente aisladas puesto que podría generarse voltajes que afecten el proceso y causen daños al sistema. En estos procesos se debe verificar siempre al finalizar el flujo del vapor, el Ph, para así poder identificar algún tipo de contaminación, en las tuberías que afecten la generación de calor, y puedan dañar las válvulas de control.

Existen cuatro métodos principales para el proceso de elevación de temperatura por circulación de vapor en tanques.

- Serpentes o placas de vapor sumergidas en el tanque.
- Intercambiadores de calor externos al tanque.
- Camisas de agua rodeando el tanque.
- Inyector de vapor en la chaqueta o el tanque directamente.

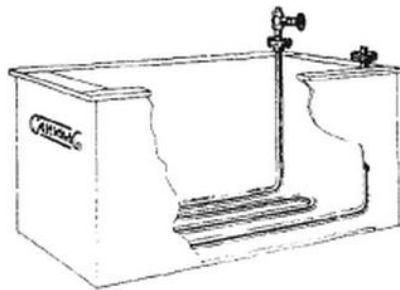


Figura 1.3 Calentador por Circulación de Vapor [2]

1.2.2. CALENTADOR POR CIRCULACIÓN DE CORRIENTE

1.2.2.1. Principio de elevación de temperatura en un conductor.

Se maneja en un principio básico del comportamiento de los metales, en el que se dice que al paso de la corriente por un conductor suponiendo una resistencia constante, la temperatura de dicho conductor será elevada.

Al paso de corriente por el conductor se genera una potencia.

$$P = R \times I^2 \quad (1.2)$$

P = Potencia

R = Resistencia

I = Corriente

Esta potencia P se divide en dos potencias.

- P1 disipada en el ambiente.

- P_2 que es la que se genera en calor en el conductor

Entonces se podría asumir que

$$P_2 = P - P_1 \quad (1.3)$$

Se deben plantear, ciertos términos para realizar la explicación pertinente

θ = Temperatura del conductor por sobre la temperatura ambiente en un determinado momento.

$d\theta$ = Elevación de temperatura desde un instante t a un $t+dt$.

c = Calor específico del conductor (J/Kg.grado).

δ = Densidad del conductor (Kg/m^3)

l = Longitud del conductor (m)

s = Sección del conductor (m^2)

p = Perímetro de la sección del conductor (m)

m = Masa del conductor = $(l \times \delta \times s)$ (kg)

Se debe tomar en cuenta que la disipación de calor del conductor se da en la superficie de contacto la cual puede ser representada con S , y se establece como $S = p \times l$.

También se puede definir lo siguiente:

$$P_2 = m \times c \quad (1.4)$$

$$P_1 = K \times s \quad (1.5)$$

Conociendo que al tener un dt en tiempo de flujo de corriente sobre un conductor, también se tendrá un $d\theta$ de temperatura en el mismo.

Con estos términos se puede reemplazar la Ec. (1.1), Ec. (1.3) y Ec. (1.4) en la Ec. (1.2), y se obtiene la siguiente expresión.

$$m \times c \times d\theta = R \times I^2 \times dt - K \times s \times dt \quad (1.6)$$

Reemplazando m y s de los términos.

$$ls\delta \times c \times d\theta = R \times I^2 \times dt - K \times pl\theta \times dt \quad (1.7)$$

Reemplazando de la Ecuación (1.5), por la ecuación de la resistencia en base a su resistividad se tiene.

$$ls\delta \times c \times d\theta = \frac{\rho l}{s} \times I^2 \times dt - K \times pl\theta \times dt \quad (1.8)$$

Si a la ecuación (1.6) se le multiplica por s/l se tiene.

$$\rho l^2 dt - Kps \cdot \theta \cdot dt = s^2 \delta c \times d\theta \quad (1.9)$$

Reemplazando el nombre de ciertos valores constantes

$$s^2 \delta c = A$$

$$\rho l^2 = B$$

$$Kps = C$$

Por tanto se tiene

$$Bdt - C\theta dt = Ad\theta \quad (1.10)$$

De esta ecuación se obtiene

$$\frac{C}{A} dt = \frac{d\theta}{\frac{B}{C} - \theta} \quad (1.11)$$

Al integrar ésta ecuación se tendrá

$$-\frac{c}{A}t = \ln\left(\frac{B}{c} - \theta\right) + \ln M \quad (1.12)$$

Siendo $\ln M$ una constante producida por la integración, y aplicando antilogaritmos, se obtiene:

$$e^{-\frac{c}{A}t} = M\left(\frac{B}{c} - \theta\right) \quad (1.13)$$

Se conoce que en $t=0$, $\theta=0$, por tanto reemplazando en la ecuación se tiene que $M = \frac{c}{B}$, y finalmente se tiene la ecuación del incremento de la temperatura en un conductor con respecto al tiempo.

$$\theta = \frac{B}{c}\left(1 - e^{-\frac{c}{A}t}\right) = \frac{\rho I^2}{Kps}\left(1 - e^{-\frac{Kp}{s\delta c}t}\right) \quad (1.14)$$

Después de este análisis se puede notar que el incremento de la temperatura de un metal, es exponencial como se observa en la Figura 1.4 y depende de sus características físicas fundamentales, en base a este principio, se realiza el calentador por circulación de corriente.

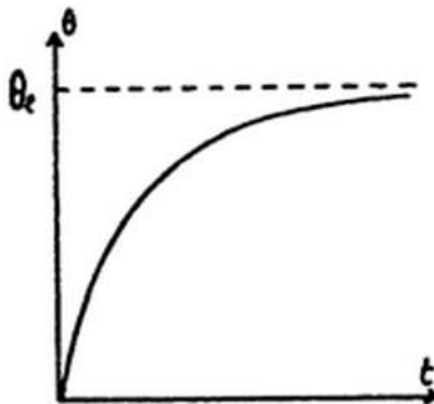


Figura 1.4 Forma exponencial en la elevación de temperatura de un conductor con respecto al tiempo.

1.2.2.2. Conductor de Titanio

El titanio es el más usado para, elevación de temperatura, generalmente viene con recubrimiento de níquel o cromo.

Dos grados de titanio son usados para el procedimiento, el titanio puro (IMI designación 125), y la aleación de titanio con paladio, en un porcentaje mínimo de paladio del 0.15% (IMI designación 260).

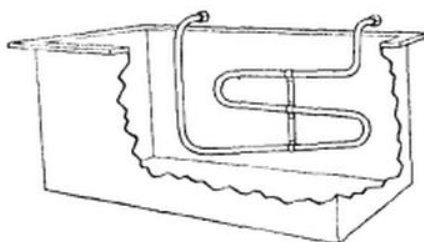


Figura 1.5. Calentador por Circulación de Electricidad en Titanio [3]

El Titanio 260, es ideal para situaciones en las cuales, el conductor se encuentre dentro de cualquier tipo de ácido, todos los conductores deben tener una protección anódica. La protección anódica es necesaria cuando el conductor de titanio se encuentra sumergido en soluciones de ácido sulfúrico, caso contrario se podrá generar corrosión en el titanio, el titanio puede ser protegido por iones de cloro.



Figura 1.6. Calentador Eléctrico de Titanio

En base a los principios eléctricos antes explicados, y con el conocimiento del manejo que se puede tener con el titanio en la circulación de electricidad, se ha escogido el método del calentador de circulación de electricidad en titanio, para la elevación de temperatura en el presente proyecto con el elemento que se encuentra en la Figura 1.6.

1.3. SISTEMA DE DETECCIÓN DE TEMPERATURA

Se ha denominado sistema de detección, a un aparte del sistema de control de lazo cerrado de una planta, conformada por el sensor y el transmisor, a continuación se dará una breve explicación acerca de los diferentes sensores de temperatura, y del transmisor específico que será utilizado en el proyecto.

1.3.1. SENSORES DE TEMPERATURA

En la actualidad existen varias formas de realizar medidas de temperatura, de manera eléctrica, de manera mecánica y por radiación térmica, existiendo en estos tres grupos diferentes elementos.

Dentro de los sensores de medición por electricidad, los principales son:

- RTD o Termoresistencias.
- Termistores
- Termocuplas

1.3.1.1. RTD o Termoresistencia

El principio de funcionamiento de las RTD dice que la temperatura influye en la resistencia de los materiales, entonces al existir un cambio de temperatura en el ambiente también se tendrá un cambio de resistencia en los materiales.

El elemento más utilizado como termoresistencia, es el platino **Pt**, por ser el material más estable y exacto, otros materiales usados son, níquel, aleaciones de níquel-hierro, cobre y tungsteno. Una de las características principales de los RTD es la linealidad.

1.3.1.2.Termistor

Los termistores son más económicos que las RTD, a pesar de no tener una respuesta lineal a la variación de temperatura, son incluso más sensibles que las termoresistencias. Los termistores son prácticamente semiconductores que emiten una respuesta resistiva al cambio de temperatura. Existen dos tipos, el termistor NTC (Negative Temperature Coeficient), y el PTC (Positive Temperature Coeficient).

Los NTC están creados a partir de una mezcla de óxidos de manganeso, níquel, cobalto, cobre y hierro, en general su variación resistiva se da entre los 50Ω y $1M\Omega$, si bien la variación resistiva en el termistor NTC, puede darse debido a un cambio de la temperatura en el medio, por el efecto joule, puede variar su resistencia debido al cambio interno de la temperatura, ocasionado por el flujo de corriente. Para obtener una respuesta que se aproxime a la lineal se puede conectar dos termistores NTC en paralelo.

1.3.1.3.Termocupla.

La termocupla es el sensor más utilizado en la industria, se forma de la unión de dos conductores de distinto material. Debido a los efectos de Peltier, Thomsom y Seebeck, genera un voltaje en sus terminales proporcional a la temperatura en el entorno. El efecto de Peltier dice que si se envía corriente eléctrica a través de dos conductores, que se encuentran unidos en un punto o juntura, siempre y cuando los dos conductores sean de distinto material, dependiendo el sentido de la corriente, en un punto la temperatura aumenta, mientras en el otro decrece.

El efecto de Thomson tiene mucho que ver con el efecto de Peltier, pero explicado desde otro punto, en el cual dice que si existe un flujo de corriente en un conductor, también existirá un gradiente de temperatura.

El efecto Seebeck, concebido por el investigador del mismo nombre, se conoce ahora como el mismo efecto Peltier pero visto desde el control de temperatura, mas no del control de la corriente, Seebeck descubrió que cuando a las terminales de dos metales unidos por una junta, se les ponía distintos valores de temperatura, y se colocaba una brújula, la misma se direccionaba del punto de mayor temperatura a menor temperatura, por lo que a éste fenómeno lo llamó, fenómeno termo magnético, ahora se conoce que lo que se descubrió fue que al existir un gradiente de temperatura en la junta existirá un gradiente de voltaje proporcional, lo que hace posible el control y manejo de las ahora conocidas termocuplas.

Luego de haber estudiado el principio de funcionamiento de las termocuplas o también llamadas termopares, se debe conocer que en la actualidad, existen diferentes tipos de termopares normalizados, es decir que a una temperatura determinada, deberán generar un voltaje determinado, de lo contrario existiría un problema en el momento de por ejemplo reemplazar un termopar por su desgaste, ya que en ese momento si no se tuvieran valores estándar, se debería volver a corregir a toda la planta por un simple reemplazo, puesto que no tendría la misma ganancia y se tuvieran valores equivocados.

Existen por tanto 7 clases de termopares, con características específicas independientes de los fabricantes, las cuales están normadas y estandarizadas por el American National Standards Institute (ANSI), el American Society for Testing and Materials (ASTM).

Visto las características de los sensores, para el proyecto se optó por utilizar como sensor, una termocupla, y dentro de estas por los rangos de temperatura y características, se optó por una termocupla tipo K.

Tabla 1.2. Termopares Normados y Sus Características

TIPO	COLOR	ALAMBRE +	ALAMBRE -	RANGO DE TEMPERATURA(°C)	COEFICIENTE DE SEEBECK (uV/°C)
J	Negro	Fe	Constantan	-210 a 1200	50
K	Amarilla	Cromel	Alumel	-270 a 1372	40
T	Azul	Cu	Constantan	-270 a 400	39
E	Violeta	Cromel	Constantan	-270 a 1000	59
N	Naranja	Nicrosil	Nisil	-270 a 1300	25
R	Verde	Pt + Rh	Pt	-50 a 1768	5-10
S	Verde	Pt + Rh	Pt	-50 a 1768	5-10
B	Gris	Pt + Rh	Pt + Rh	0 a 1820	1-10
G	Rojo	W + Re	W + Re	0 a 2320	10-13
C	Rojo	W + Re	W + Re	0 a 2320	10-13
D	Rojo	W + Re	W + Re	0 a 2320	10-13

1.3.2. TRANSMISOR DE TEMPERATURA

El transmisor es el encargado de tomar el dato del sensor, en este caso la termocupla, y enviarlo al controlador con valores normados que pueden ser leídos sin ningún problema, el arreglo sensor transmisor utilizado en el proyecto es el MAX31855T, y sus características serán explicadas a continuación.

1.3.2.1. MAX31855T

Características principales:

- Compensación de unión fría.
- Lectura de 14Bits con una resolución de 0.25°C.
- Versión disponible para termocuplas tipo, K, J, N, T, S, R y E.
- Simple interface SPI compatible, solo de lectura.
- Detector de bajo valor de GND y VCC.
- Detector de termocupla desconectada.
- Voltaje de alimentación de 3V a 3.6V.

Mediante la comunicación SPI se permite tomar el dato del MAX31855, a través de un pin de salida que será controlado por la señal de reloj proveniente del microcontrolador, y de la orden de activación en cero lógico, que también proviene del microcontrolador.

Se debe tener un perfecto conocimiento acerca de esta operación ya que en este proceso se obtiene la temperatura en el etilenglicol y se podrá controlar dicha temperatura.

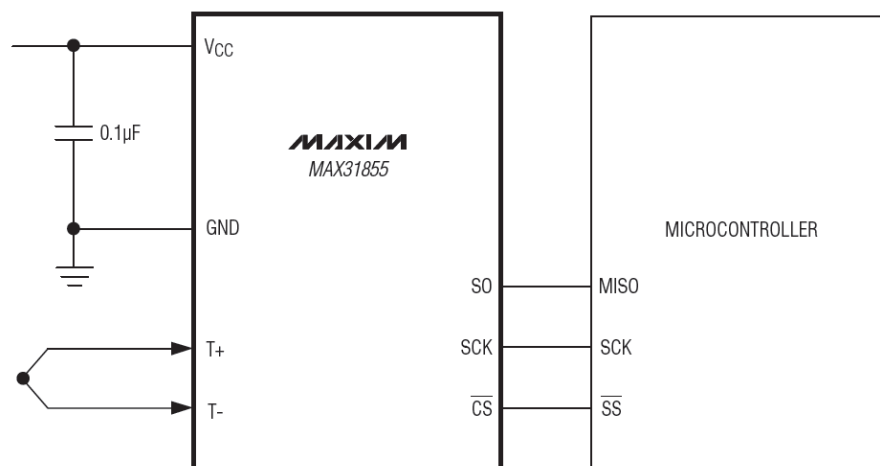


Figura 1.7. Diagrama de Bloques MAX31855 y Microcontrolador [4]

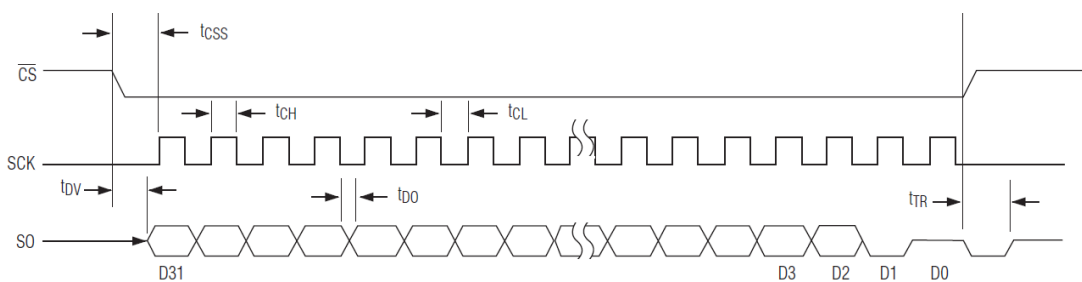


Figura 1.8. Protocolo de Funcionamiento SPI en el MAX31855

En el momento de ya haber obtenido los datos con el protocolo de comunicación SPI, se obtendrán 32 Bits, los cuales son paquetes de información explicados en la siguiente tabla.

El MAX31855, tiene la capacidad de enviar datos de la termocupa, tanto en valores negativos y positivos, como en valores enteros y decimales, la manera en cómo se debe interpretar el dato para hacer una lectura correcta, se explica en la siguiente tabla.

Tabla 1.3. Mapa de Datos del MAX31855 [6]

BIT	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
D[31:18]	14 Bits de dato de la Termocupla	Son 14 Bits del dato de temperatura que da la Termocupla
D17	Reservado	Siempre deberá ser cero
D16	Falla	Se leerá 1L cuando exista alguna falla en SCV, SCG u OC
D[15:4]	12 Bits de dato de la temperatura interna	Dato de la temperatura en la juntura
D3	Reservado	Siempre deberá ser cero
D2	SCV Falla	Se leerá 1L cuando exista un corto circuito en VCC, caso contrario se lee 0L
D1	SCG Falla	Se leerá 1L cuando exista un corto circuito en GND, caso contrario se lee 0L
D0	OC Falla	Se lee 1L cuando la termocupla nos está bien conectada

Tabla 1.4. Ejemplo de datos de obtención de Temperatura

Temperatura °C	Salida Digital (D[31:18])
+ 1600.00	0110 0100 0000 00
+ 1000.00	0011 1110 1000 00
+ 100.75	0000 0110 0100 11
+25.00	0000 0001 1001 00
0.00	0000 0000 0000 00
-0.25	1111 1111 1111 11
-1	1111 1111 1111 00
-250	1111 0000 01100 00

1.3.2.2. Comunicación SPI

La comunicación SPI es un protocolo de comunicación serial, de tipo sincrónica, ésta comunicación es propicia cuando teniendo distintas unidades de control denominadas esclavos, se tiene un solo controlador también llamado, master.

Sus líneas de control son las siguientes:

Tabla 1.5. Líneas de Función en comunicación SPI

Línea	Función
SCK	Señal de reloj para envío de la información
MISO/MOSI	Línea de envío de información de Maestro a Esclavo o viceversa
\overline{SS}	Señal de activación de los esclavos.

El maestro es aquel que inicia la transferencia de información, y genera la señal de control \overline{SS} y la señal de reloj SCK, el Esclavo es el dispositivo controlado por el Maestro, el cual envía y recibe la información únicamente cuando el maestro ha puesto en cero lógico el control \overline{SS} .

En un determinado momento puede existir comunicación entre un Maestro y un solo Esclavo, los demás deberán estar inactivos por medio de una alta impedancia en su control.

La señal en la línea denominada SCK, es una señal generada por el maestro y es la que sincroniza el intercambio de información con los esclavos.

En el envío de información pueden existir dos modalidades, MISO y MOSI.

MOSI (Master Out Slave IN), transporta los datos desde el maestro hacia el esclavo.

MISO (Master IN Slave Out), transporta los datos desde un esclavo hacia el maestro.

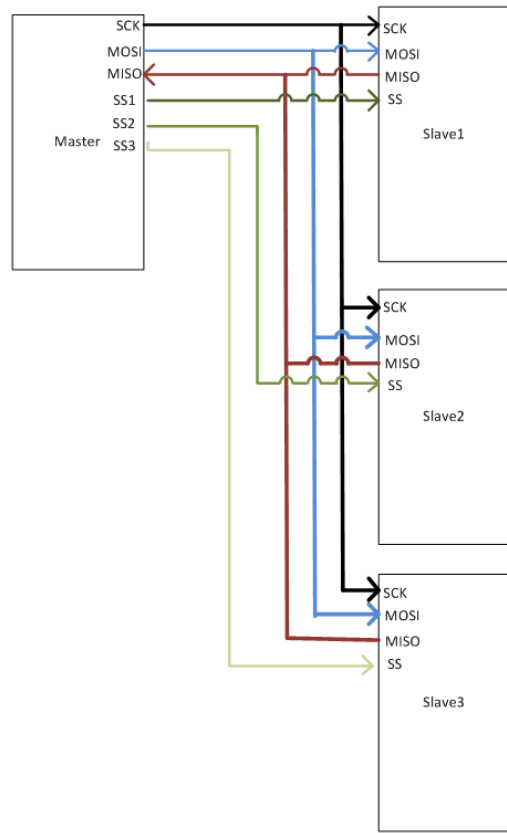


Figura 1.9. Diagrama de Bloques de Comunicación SPI

CAPÍTULO 2.

DESARROLLO DEL HARDWARE DEL SISTEMA

2.1. ESTRUCTURA DE REFRIGERACIÓN DE LA PLANTA.

La estructura diseñada para la refrigeración, es la parte físicamente más grande ya que en ésta se sitúa los componentes de refrigeración como es el compresor, el evaporador, el condensador, caja de relés, regulador de voltaje y fuentes de corriente continua.

El evaporador, que es la cañería conocida como serpentín, se encuentra alrededor del envase donde se colocará el líquido cuya temperatura será controlada.

En las Figuras 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 se presenta las vistas frontal, posterior, dos laterales, y la vista superior respectivamente.



Figura 2.1. Imagen Vista Frontal y Vista posterior



Figura 2.2. Imágenes Vista Lateral 1



Figura 2.3. Imagen Vista Lateral 2



Figura 2.4. Imagen Vista Superior

2.2. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

Presentadas la estructura de la planta, se presentan los componentes que en ella constan, y sus principales características.

2.2.1. COMPRESOR

La marca escogida para el motor del sistema de refrigeración fue TECUMSEH, que es una marca reconocida de compresores recomendados para aplicaciones de refrigeración comercial, para conocimiento de los tipos de compresores, fue facilitado un catálogo de compresores por parte de los vendedores.

El catálogo muestra que según el tipo de refrigerante usado existe una categoría de compresor, y dentro de esas categorías, existen distintos motores que difieren entre sí de acuerdo a la capacidad, y voltaje de alimentación, se considera que todos los compresores funcionan a una frecuencia de 60Hz.

El compresor recomendado para el presente proyecto, fue un compresor de 1/8 HP de capacidad ya que es el que funciona con las condiciones adecuadas para un sistema de refrigeración, un compresor de más capacidad sería innecesario, y por la alimentación general del sistema y el entorno de utilización, se buscó un compresor de 110V de alimentación, de éste análisis se procedió a conseguir el compresor **AZ1340D**, el cual usa un refrigerante tipo R12.

Tabla 2.1. Catálogo de Motores para Refrigeración Industrial

REFRIGERANTE R12		
CAPACIDAD	VOLTAJE	REFERENCIA
1/5 hp	110V	AZ1360DS
1/5 hp	110V	AE1360AS
1/6 hp	110V	AZ1355D
1/8 hp	110V	AZ1340D
3/8 hp	110V	AE2413A



Figura 2.5. Modelo de Compresor Escogido



Figura 2.6. Compresor Instalado en la Planta

Al querer cargar el compresor con el refrigerante R12, se conoció que este tipo de gas ya no existe en gran cantidad en el mercado puesto que causa daño a la capa de ozono, y que por este motivo para los compresores de la marca mencionada, que usan

el refrigerante R12, también se puede usar el refrigerante R134a, que es el que se pudo obtener.

2.2.2. REFRIGERANTE

Nombre Comercial: R134a Gas Refrigerante

Nombre Químico: Tetrafluorometano

Efectos en los ojos: Congelamiento de los ojos al contacto.

Efectos en la piel: Congelamiento al mantenerse en contacto un tiempo considerable.

Código NFPA de peligro:



Figura 2.7. Código NFPA del Refrigerante R134a

- Peligro moderado para la salud (Azul 2)
- Peligro leve de inflamabilidad (Rojo 1)
- Sin peligro de radioactividad (Amarillo 0)
- Sin peligros específicos (Blanco)

Características Fisicoquímicas:

Tabla 2.2. Características Fisicoquímicas del Gas Refrigerante R134a

Parámetro	Valor	Unidad
Estado Físico	Gasesoso	
Presión de Vapor	665.5	KPa
Densidad de Vapor	5.28	Kg/m^3
Punto de Ebullición	-26.1	$^{\circ}C$
Punto de Fusión	-96.6	$^{\circ}C$
Masa Molecular	102.03	g/mol
Apariencia	Gas incoloro con un ligero olor a Éter	

2.2.3. CONDENSADOR

El condensador como ya se habló en el primer capítulo es el encargado de llevar la energía calórica que salió del líquido al medio ambiente, es un sistema de cañería similar al radiador de un automóvil, y para que la energía calórica no salga al medio externo cercano al sistema de refrigeración, existe un ventilador que direcciona la energía calórica que sale.



Figura 2.8. Condensador Instalado en la Planta

2.2.4. VENTILADOR

Como se mencionó anteriormente el ventilador es el encargado de direccionar la energía calórica que sale desde el serpentín del condensador hacia el medio ambiente, producto del intercambio de energía.

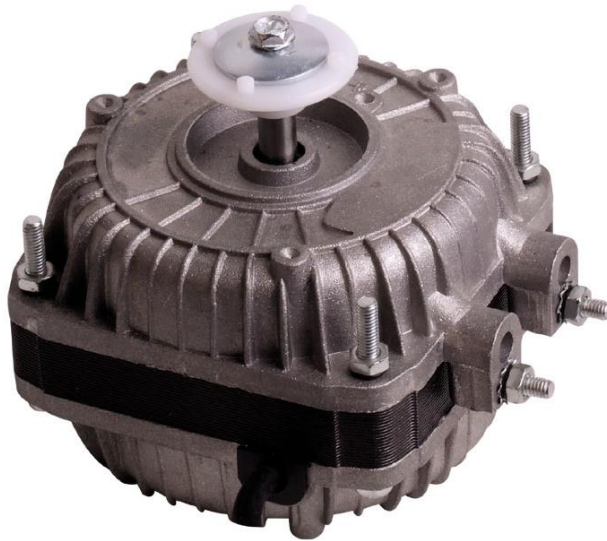


Figura 2.9. Modelo de Ventilador Utilizado

Alimentación: 110 – 240V

Frecuencia: 50 y 60Hz

Potencia: 5 – 34W

Velocidad: 1300 rpm



Figura 2.10. Ventilador Instalado en la Planta

2.2.5. EVAPORADOR

El evaporador es la cañería encargada de transferir la energía calórica desde el recipiente con etilenglicol, hacia el gas refrigerante por tanto debe estar colocado de tal manera que rodee internamente a todo el recipiente.



Figura 2.11. Evaporador Instalado en la Planta



Figura 2.12. Serpentin del Evaporador instalado en el Envase

2.3. AGITADOR



Figura 2.13. Agitador Instalado

Es un motor de giro por inducción que funciona con un voltaje alterno entre 120V y 210V, es un motor de 1500 RPM, el cual tiene un giro constante, en su parte inferior se instaló el agitador propiamente dicho el cual debe tener ciertas características.

2.4. CALENTADOR

Como se explicó en el capítulo uno, el calentador es una resistencia eléctrica, que al paso de la corriente genera calor como efecto a la oposición de dicho flujo.

Como elemento resistivo puede funcionar a cualquier voltaje pero la característica a 230V de alimentación es tener una potencia de 2000W.

Para el presente proyecto, ya que todo el sistema funciona a 110V, la alimentación de esta resistencia térmica no será la excepción.



Figura 2.14. Calentador Instalado

2.5. ELEMENTOS DE CONTROL DE LA PLANTA.

Se presenta las conexiones de los elementos electrónicos como diagrama y en imagen, se explica a que corresponde cada conexión.

2.5.1. PULSADORES DE CONTROL

Los tres pulsadores son elementos de control los cuales puede manejar el usuario, el primer pulsador es un reseteo de todo el controlador para casos en los que esta acción sea necesaria, dicho pulsador se encontrará más resaltado de y color rojo, diferenciándose de esta manera de los otros pulsadores, el segundo pulsador es el

encargado de disminuir el valor del setpoint de temperatura a la que se desea mantener el líquido de la planta, y el tercer pulsador es con el cual se puede aumentar el valor del setpoint para el control de temperatura.

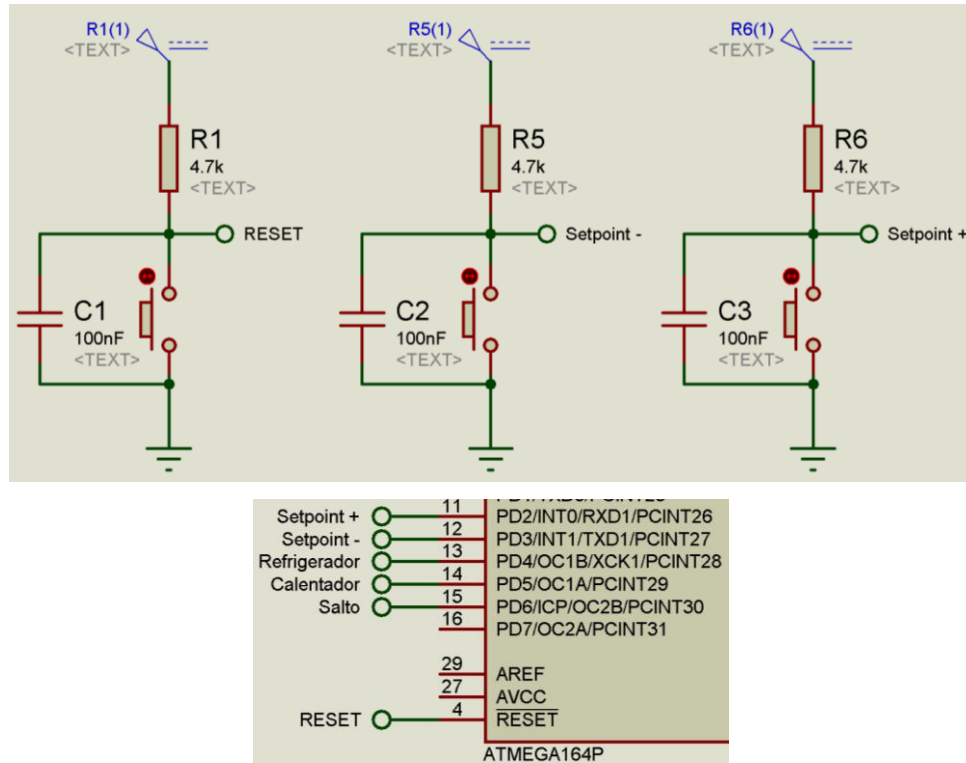


Figura 2.15. Pulsadores de Control y Pines Correspondientes

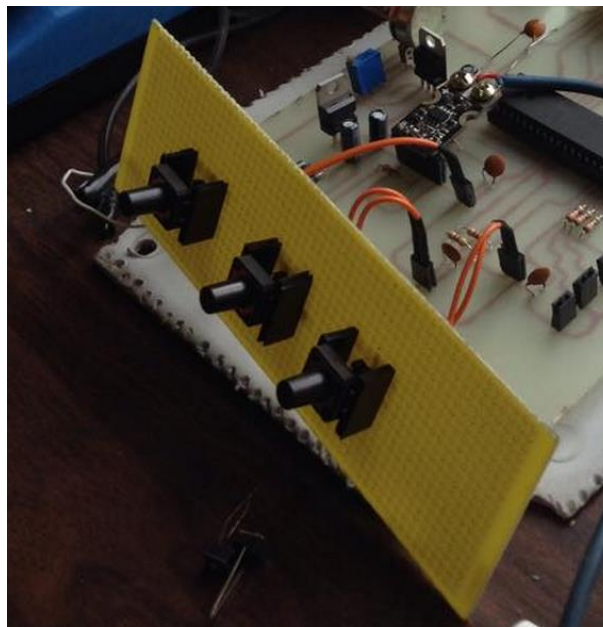


Figura 2.16. Matriz de pulsadores conectados a la placa de control

Los pines correspondientes en el microcontrolador son los que se observan en la Figura 2.15. Para instalarlo en la caja de control, se realizó una matriz de tres pulsadores en una placa diferente a la placa de control, esta placa fue colocada en la parte frontal de la caja de control, y envía los cambios de estado de los pulsadores a través de una conexión mediante cable tipo bus.

2.5.2. INDICADORES

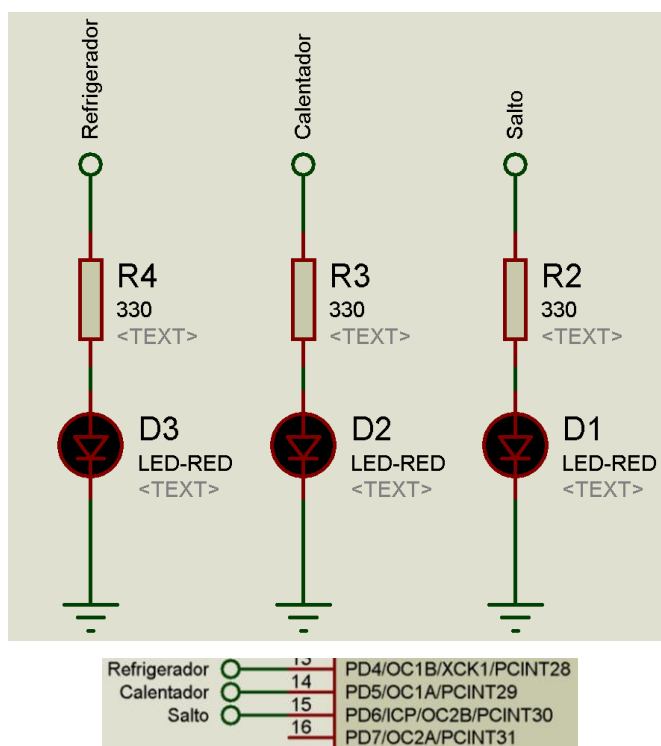


Figura 2.17. Indicadores y Pines correspondientes

El primer indicador visto desde la izquierda de la Figura 2.17, es un LED que se encenderá cuando el puerto indicado con el nombre refrigerador envíe una señal 1L, lo que indicará que en ese momento se debe encender el sistema de refrigeración, el segundo indicador se activa cuando se enciende el calentador para elevar la temperatura de la planta, y el tercer indicador se enciende cuando hay un valor de temperatura incorrecto, el LED se enciende hasta que el error sea corregido por el programa.

Se ha hecho una rutina de programación dentro del atmega164p para que el error de medida sea corregido, dicha rutina será explicada en el capítulo de software del proyecto. Los pines y el puerto usado es el que se indica en la Figura 2.17.

Así mismo como en el caso del control de los pulsadores, también se realiza una matriz de Leds en una placa fuera de la placa de control, y para que los leds indicadores se enciendan se conectará las salidas correspondientes de la placa de control con la matriz mediante conductores tipo bus.

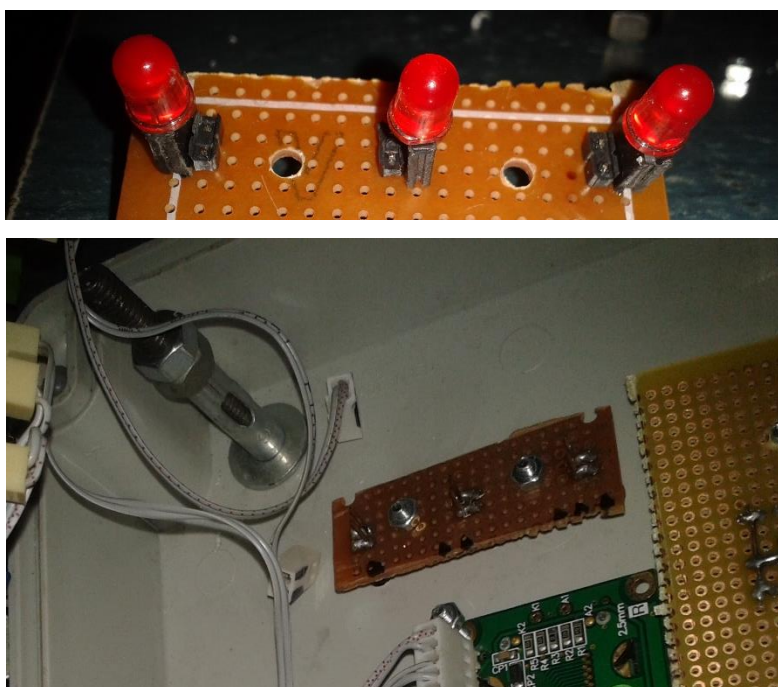


Figura 2.18. Matriz de LEDs conectadas en la caja de control

2.5.3. PANTALLA INDICADORA LCD

En el LCD se indicarán tres parámetros constantemente, el valor de la temperatura actual que el termopar está recibiendo, el valor de setpoint o valor de temperatura a la que se desea mantener a la planta, y la temperatura del transmisor MAX31855, ya que por características propias de dicho transmisor, si su temperatura se eleva a más de 40°C comenzará a tener daños permanentes, y se debe verificar constantemente el

valor antes mencionado, el puerto de control en el microcontrolador es el que se muestra en la Figura 2.19.

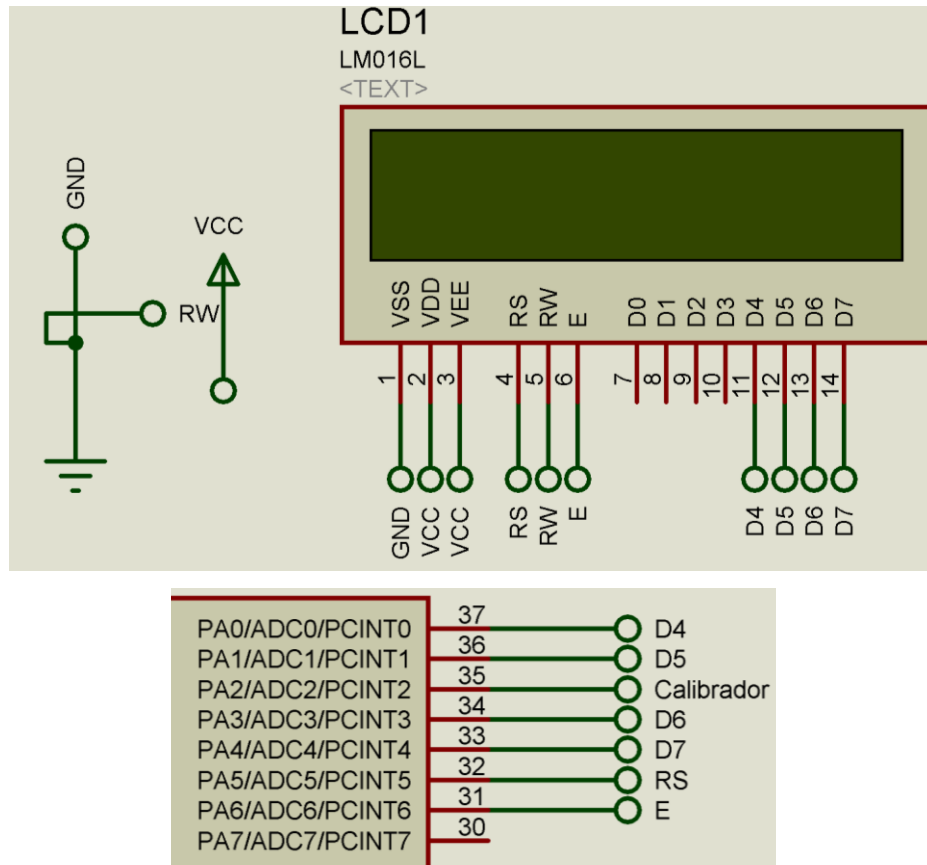


Figura 2.19. LCD y puerto de control

Para que el LCD pueda estar empotrado de una manera adecuada a la caja de control, se realizó una conexión entre la placa de control y el LCD mediante conductores tipo bus.

Los tres elementos mencionados (matriz de pulsadores, matriz de LEDs, y LCD), son los elementos externos los cuales se podrán observar y manipular, estos elementos de control y visualización, como ya se ha mencionado, van empotrados, a la caja de control, y luego de ser empotrados serán conectados a la placa de control.

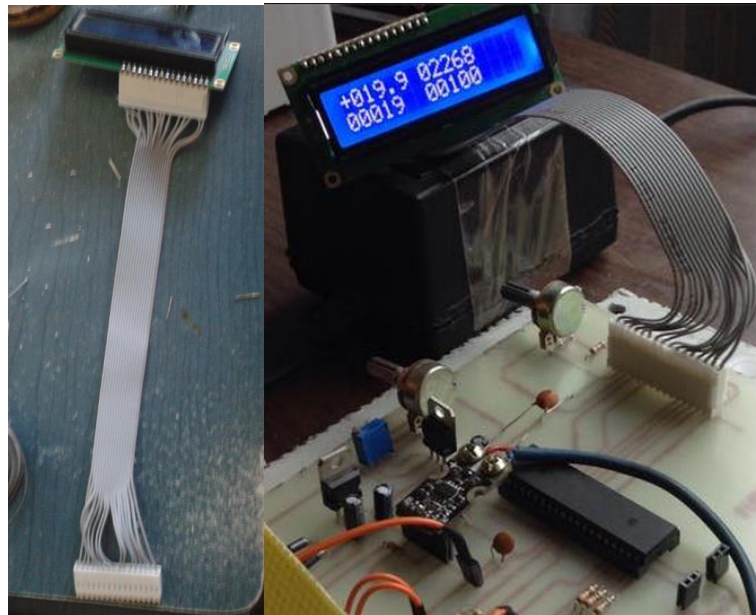


Figura 2.20. Conexión LCD y placa de control mediante conductores tipo bus.

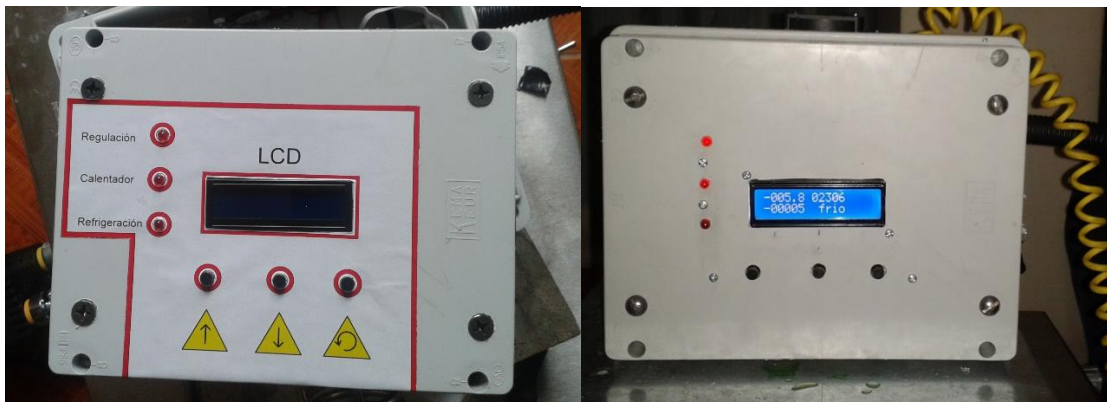


Figura 2.21. Matriz de LEDs, Pulsadores y LCD empotrados a la Caja de Control

Los pulsadores, indicadores, y LCD, estarán conectados a la placa de control por cables tipo BUS, para facilitar la conexión.

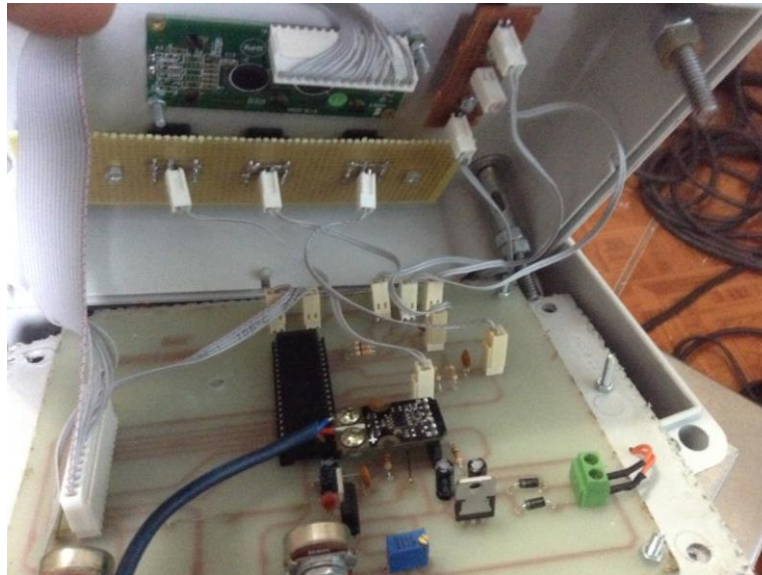


Figura 2.22. Conexión Placa de control y Matrices

2.5.4. TRANSMISOR DE TEMPERATURA

Como ya se ha mencionado anteriormente el MAX31855 es un transmisor de temperatura el cual recibe el valor de temperatura en forma de microvoltios desde la termocupla, y lo envía mediante comunicación SPI al microcontrolador, el protocolo de comunicación será explicado en el capítulo de Software de la planta, en esta sección del proyecto hay que destacar que se debe realizar una regulación de voltaje para dicho transmisor puesto, que funciona con un valor de 3.3V, los pines correspondientes de control se presentan en la Figura 2.23.

La placa de control tendrá un sócalo donde se coloque al transmisor de temperatura, dicho transmisor no se conecta mediante bus como otros elementos externos a la placa de control, ya que no es necesario visualizarlo, lo que se debe tener en cuenta en todo momento es que no se sobrecaliente.

Esto se logrará con un sistema de ventilación que se explicará posteriormente.

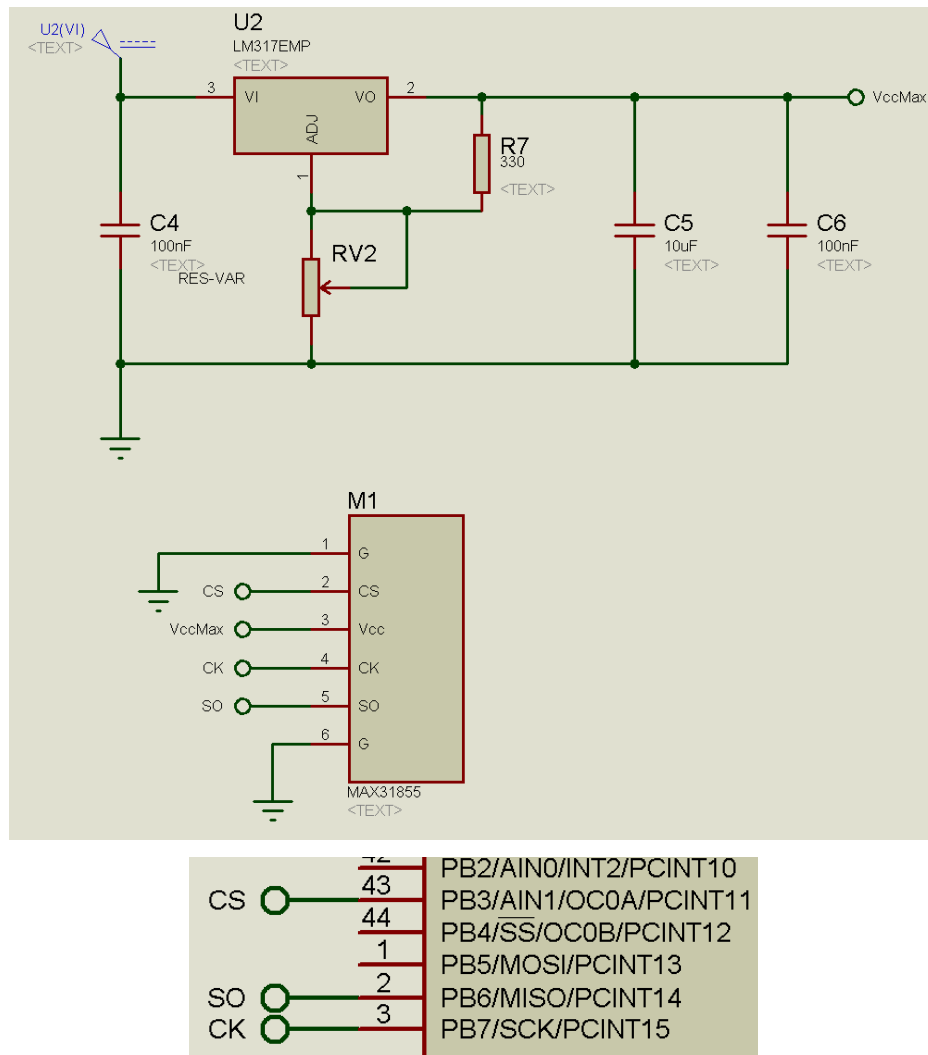


Figura 2.23. Conexión Transmisor de temperatura y Puerto utilizado.

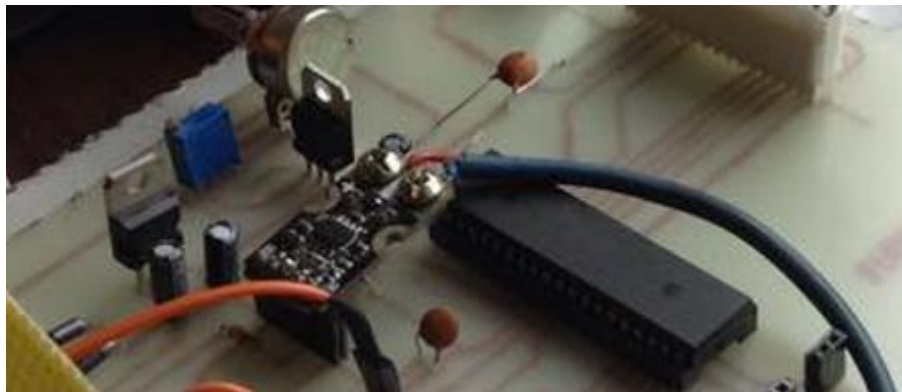


Figura 2.24. Transmisor de temperatura instalado en la Placa de Control

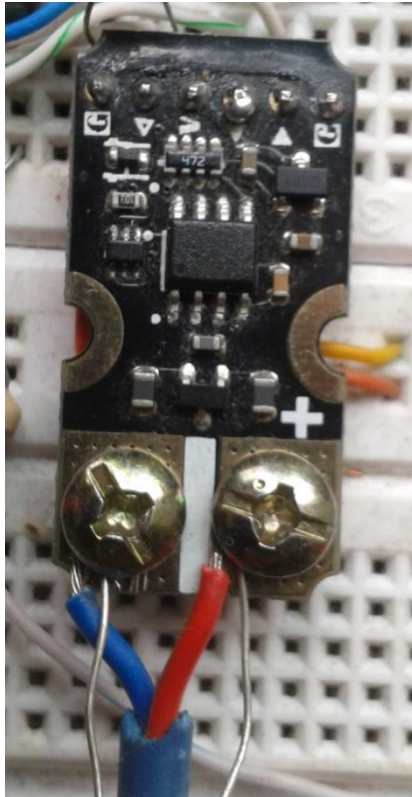


Figura 2.25. Transmisor de temperatura Usado en el Proyecto

2.5.5. ENTRADA ANALÓGICA DE CALIBRACIÓN

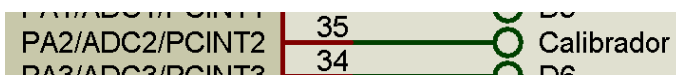
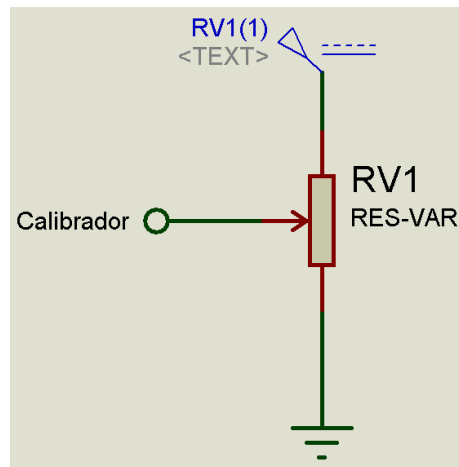


Figura 2.26. Entrada Analógica Para Calibración.

Inicialmente esta opción fue utilizada para calibrar el sistema hasta encontrar un valor adecuado para la pendiente de compensación de temperatura que será explicada en el capítulo de software de la planta. Posterior a encontrar el valor adecuado se optó por dejar esta opción en la planta ya que a futuro la termocupla o el sensor podría ser reemplazado, por lo que llegado el caso se debería volver a calibrar la pendiente. Únicamente se utiliza un Pin de todo el microcontrolador y es el que se ve en la Figura 2.26.

2.5.6. RELÉ DE ACTIVACIÓN DE CALENTADOR Y SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

Los mismos pines que controlan a los indicadores de encendido y apagado del calentador y del sistema de refrigeración, también son los encargados de encender a los relés de control de dichos elementos, por las características eléctricas, de consumo de corriente, además de que se vio la necesidad de tener un sistema aislado del sistema de control, se optó por utilizar relés de estado sólido.

El relé de estado sólido es un elemento electrónico con una función similar al relé convencional, con la diferencia que mientras el contacto del relé convencional se activa mediante magnetismo consumiendo una corriente mayor y generando ruido a un sistema de precisión, el relé de estado sólido es un sistema electrónico complejo, que genera la activación de un elemento conectado. El diagrama de la circuitería interna del relé de estado sólido usado en el proyecto es el de la Figura 2.27.

Como se puede observar en el diagrama, el relé de estado sólido se encuentra aislado en dos secciones, la sección izquierda corresponde a una entrada digital de activación del relé, esta entrada digital activará a un led el cual es parte de un opto acoplador, del lado derecho el opto acoplador activa a un opto transistor, el cual está protegido por una conexión R-C en paralelo, y ahí es donde se conecta el elemento de fuerza a ser controlado, todo el sistema de la derecha correspondería en un relé convencional simplemente al contacto que se activa mediante efecto magnético.

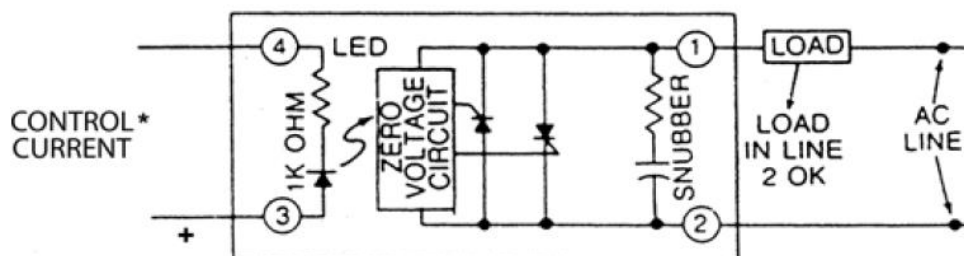


Figura 2.27. Diagrama Eléctrico Relé de Estado Sólido [7]



Figura 2.28. Relé de control instalado en la planta

El relé usado tanto para la activación del calentador como para el sistema de refrigeración es el relé de estado sólido SSR-25 DA, este relé se activa con un voltaje DC entre 3V y 32V, y la salida resiste una corriente de hasta 25 A, con un voltaje comprendido entre 4V y 380V, todas estas características están dentro de las exigencias del control de la planta.

Se podría decir que los relés de estados solidos transforman la manera de controlar el sistema, desde una voltaje continuo en un circuito de control, (que se encuentra en la placa de control, con sus respectivos pulsadores e indicadores), hasta un voltaje

alterno del circuito de fuerza que lo conforma la resistencia térmica de titanio, el compresor del sistema de refrigeración, y el agitador.

La forma de conexión inicial era la de la Figura 2.29.

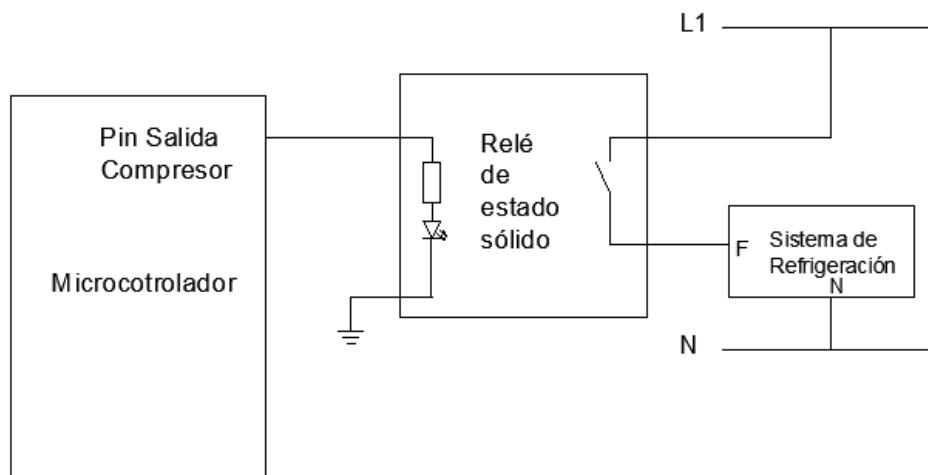


Figura 2.29. Conexión Inicial para encendido del Sistema de Refrigeración.

En pruebas realizadas en el controlador, ya conectado el relé de estado sólido, se pudo notar, que a pesar de que el relé, tiene un aislamiento óptico, al encenderse el sistema de refrigeración, el compresor genera un pico de corriente, al encendido, que altera en una unidad al valor del setpoint, por lo que se optó por conectar también un relé electromagnético, a la salida del relé de estado sólido, para que sea el relé electromagnético el que permita el flujo de intensidad eléctrica al compresor, y no el relé de estado sólido como se había planteado en un inicio. Además se implementó en la planta un regulador de voltaje para impedir daños en el sistema de control electrónico en el momento del encendido del compresor del sistema de refrigeración. La forma de conexión luego de las soluciones dadas al sistema para un mejor control sería la que se observa en la Figura 2.30

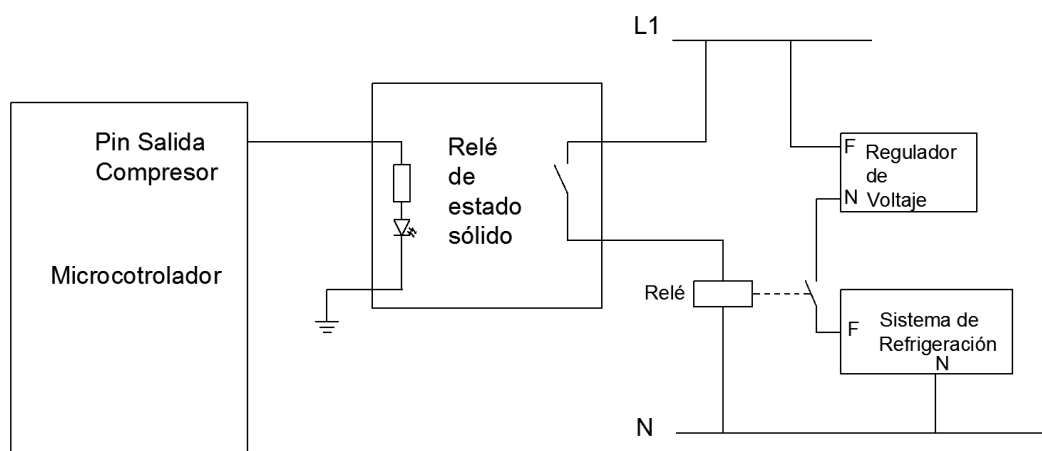


Figura 2.30. Conexión final para encendido del Sistema de Refrigeración.

2.5.7. RELÉ PARA EL ENCENDIDO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

Luego de realizar una medición de corriente en el sistema de refrigeración, se pudo notar que la corriente constante de funcionamiento no supera los 2 A, sin contar la corriente de arranque, es por eso que se buscó un relé cuyo contacto resista esa corriente y el elemento seleccionado fue el Relé Electromagnético MY4.

Las características del relé térmico utilizado son las de la Tabla 2.3:

El relé electromagnético es un elemento eléctrico el cual gracias a un principio electromagnético, al paso de corriente a través de un bobinado o contacto, cierra o abre dos conductores, llamados contactos, los cuales pueden ser normalmente abiertos o normalmente cerrados.

Tabla 2.3. Características De Relé Electromagnético

RELÉ ELECTROMAGNÉTICO	
MODELO	MY4
COLOR	Transparente
CORRIENTE PARA CARGA RESISTIVA EN VAC	5 A
VOLTAJE DE ENTRADA A LA BOBINA (AC)	6 A 220VAC
MAX VOLATEJ	110% Voltaje Nominal

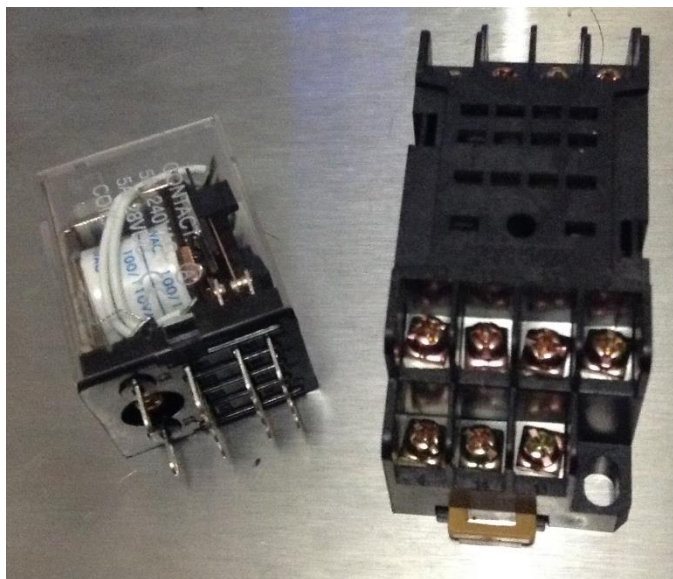


Figura 2.31. Relé Electromagnético y sócalo para encendido del Sistema de Refrigeración.

2.6. CONEXIÓN DE ELEMENTOS DE LA PLANTA.

Luego de haber presentado una explicación de todos los elementos del hardware, se procede a realizar la explicación pertinente de cómo se encuentran conectados. Se parte de un diagrama de bloques general, que incluye todos los elementos conectados entre sí.

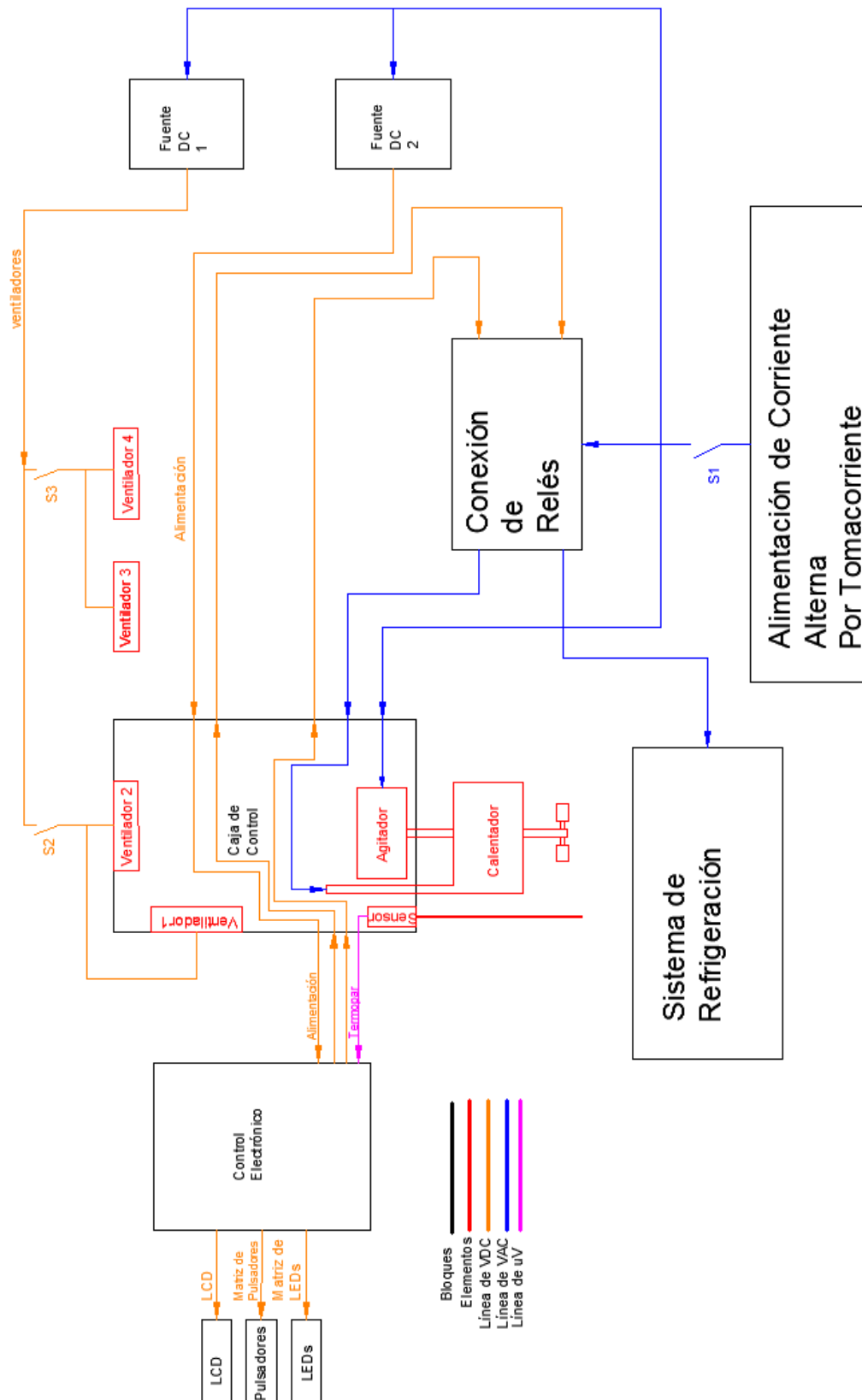


Figura 2.32. Diagrama de Bloques de la conexión de todo el sistema.

Para un mayor entendimiento visual, se coloca una sola línea de transmisión de datos o de alimentación, es decir que para una alimentación de 5VDC, solo se coloca una línea pero se entiende que en dicha línea se encuentra las líneas de positivo y el negativo.

Primero se explicará la conexión y las imágenes correspondientes al bloque del control electrónico. El bloque correspondiente a la caja de control, será el segundo bloque explicado, en el cual incluirá, la conexión de los ventiladores. Seguido al bloque anterior se presentará el circuito correspondiente al bloque de los relés y finalmente se realiza una explicación de los bloques restantes como son los bloques de alimentación de corriente continua, el bloque de corriente alterna, y el bloque del sistema de refrigeración.

Al final del presente capítulo se conocerá exactamente como se encuentra instalado y conectado todo el sistema, para en el siguiente hablar acerca del programa que hace posible todo el control.

En el bloque de control electrónico, se encuentra la placa electrónica, la cual tiene instalado un microcontrolador con el programa que realiza todas las acciones. Como entradas a este bloque se tiene, el valor en microvoltios de la temperatura proveniente del termopar, la matriz de pulsadores de setpoint y reset, y como salidas se tiene la matriz de LEDS, el LCD, y las salidas de control digital para el calentador y el sistema de refrigeración que salen del microcontrolador.

La placa electrónica como se ve en la Figura 2.34 se coloca en una base plástica del mismo material de la caja de control.

De ésta superficie plástica saldrán, el cable del termopar, un sócalo para la alimentación VDC de la placa, y las salidas digitales para el control de los relés de estado sólido.



Figura 2.33. Bloque de Control

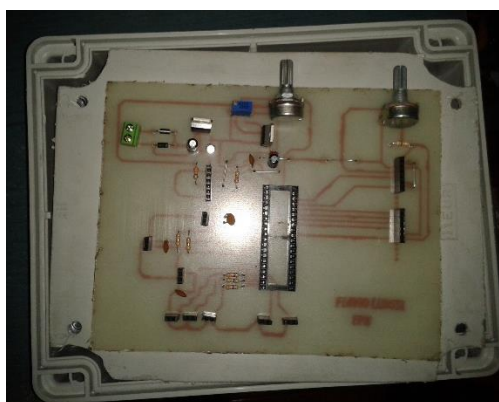


Figura 2.34. Superficie Plástica donde se coloca la Placa de Control.

En el bloque perteneciente a la caja de control se encuentran las conexiones para control que provienen desde la placa de control y desde los elementos de VAC.

Los elementos que se encuentran dentro de este bloque y que son alimentados por una misma fuente son 4 ventiladores, dos ventiladores para mantener una temperatura estable instalados dentro de la caja de control, y dos ventiladores en la parte inferior a la caja para controlar un ambiente sin gases dentro del envase con el líquido cuya temperatura se va a controlar.

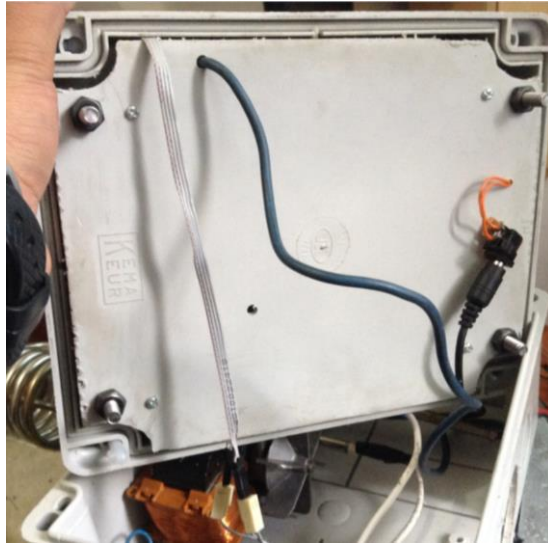


Figura 2.35. Superficie Plástica con placa de control Conectada

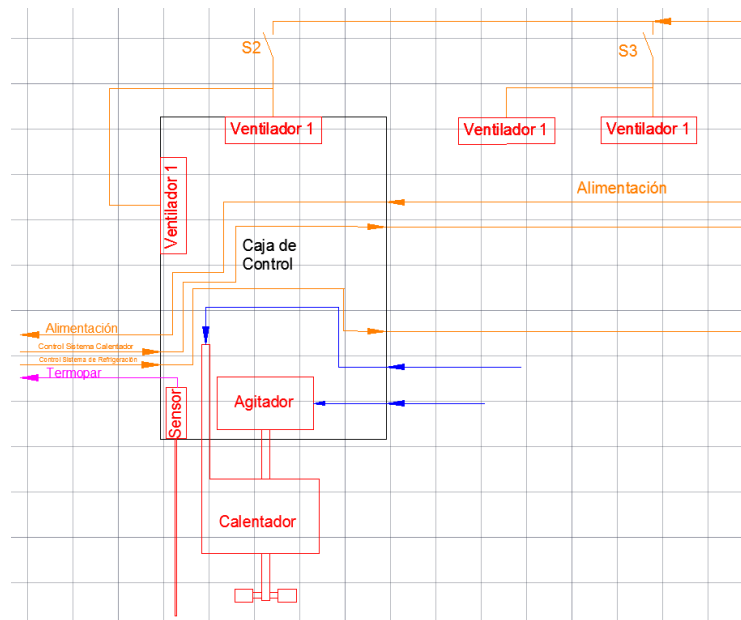


Figura 2.36. Bloque de la Caja de Control

Además de los ventiladores antes mencionados se tiene, el agitador, el calentador, y el sensor de temperatura o termopar.



Figura 2.37. Caja de Control



Figura 2.38. Conexión desde la Caja de Control hasta la Caja de relés a través de manguera

Desde este punto se envía los conductores del control digital para los relés, la alimentación para el agitador, la alimentación para la placa de control y los ventiladores, la alimentación en corriente alterna que sale del relé de estado sólido, para controlar al calentador.

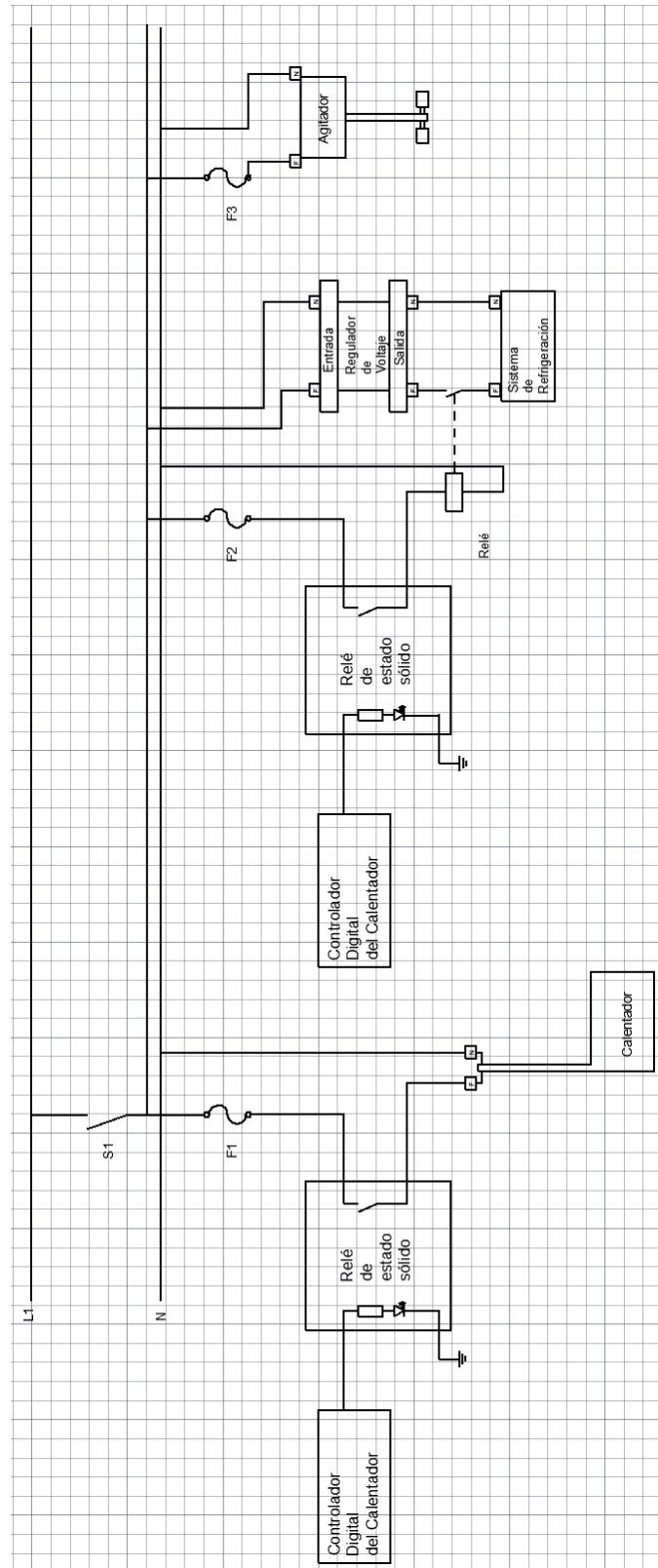


Figura 2.39. Circuito de Control del Bloque de Relés.

Estos conductores van a través de una manguera hacia la parte inferior de la planta donde se encuentran los relés, y las protecciones de encendido.

A partir de este momento la caja de control quedaría conectada correctamente y se sellaría con los respectivos seguros, desde este momento la conexión que se debe tomar en cuenta es la de los relés en la parte inferior, hay que recordar que a ésta caja llegará la alimentación de corriente alterna a toda la planta, en esta parte de la planta se debe tener en cuenta que los controles y conexiones se manejan a un voltaje alterno monofásico y que se manejan corrientes más altas de las que se maneja en el circuito de control electrónico.

Para comenzar con la explicación del bloque conformado con los relés y las protecciones se parte con el diagrama de la Figura 2.39.



Figura 2.40. Imagen de conexión del Bloque de Relés

El circuito de control muestra la conexión de un interruptor principal el cual da alimentación a tres fusibles los cuales dan a su vez energía al relé de control del calentador, al relé de control del sistema de refrigeración, y al agitador directamente.

En la Figura 2.40 se encuentra la conexión, real del circuito de control antes presentado, con los dos relés de estado sólido, el relé electromagnético, y los tres portafusibles con los fusibles F1, F2 y F3.

Para mayor entendimiento de las acciones que se encuentran en el bloque de relés se presenta una explicación más detallada de los tres ramales del circuito de control.

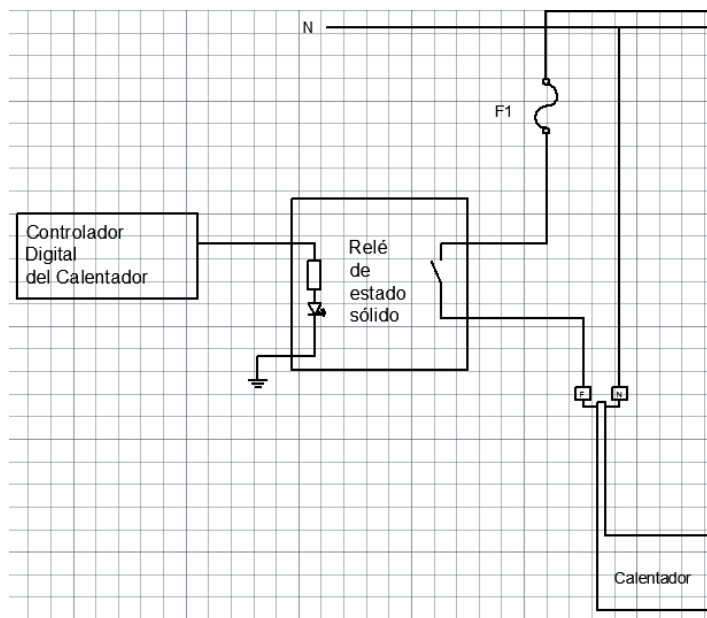


Figura 2.41. Circuito de control Bloque de Relés Ramal 1.

El fusible F1 de 5A, tipo capsula, protegerá de una sobrecorriente que pudiera ocurrir en el calentador, el dato digital de control del calentador, viene desde la placa de control ubicada en la parte superior de la planta, y baja por la manguera que une la caja de control con la caja de relés, este valor digital de corriente continua va a la entrada del relé de estado sólido, y cuando esté dato enviado sea de un nivel lógico alto o 1L, el relé permite el flujo de corriente, de su contacto, en cuyos terminales como

se ve en la imagen, estará conectada la línea de fase que va hacia el calentador, las línea de fase y neutro que alimenta al calentador, irán hacia el mismo, desde la caja de relés hasta la caja de control por la manguera de conexión.

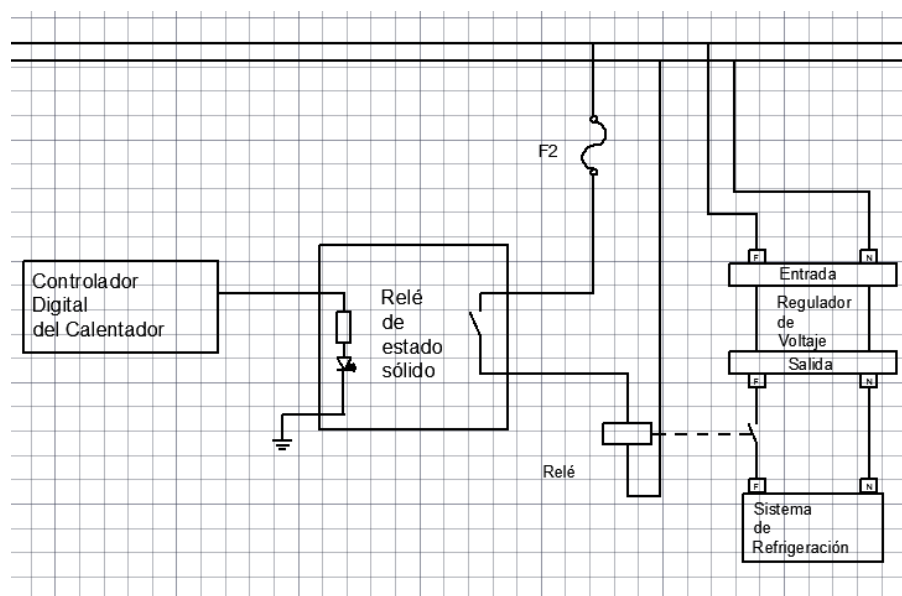


Figura 2.42. Circuito de control Bloque de Relés Ramal 2.

Este ramal es protegido por el fusible F2, con las mismas características del F1, igual que el dato digital para el calentador, el dato digital para el sistema de refrigeración, viene desde la placa de control hasta la caja de relés por la manguera, en el momento que viene un 1L (5VDC), por esta línea se activa el relé de estado sólido, alimentado de corriente alterna a la bobina del relé electromagnético, producto de este efecto, uno contacto normalmente abierto, de dicho relé electromagnético, se cierra permitiendo el paso de corriente al sistema de refrigeración que se encuentra en la parte inferior de la planta.

Cabe destacar que la alimentación del sistema de refrigeración, no es la misma que del resto de la planta, debido a la elevada corriente de arranque del compresor, fue pertinente aislar el control del mismo, por medio de un relé de estado sólido, de un relé electromagnético y de una alimentación por medio de un sistema regulador de voltaje.

Este tipo de conexión fue la que permitió un manejo adecuado, de toda la planta sin errores de toma de datos y posibles daños por sobrecorriente.

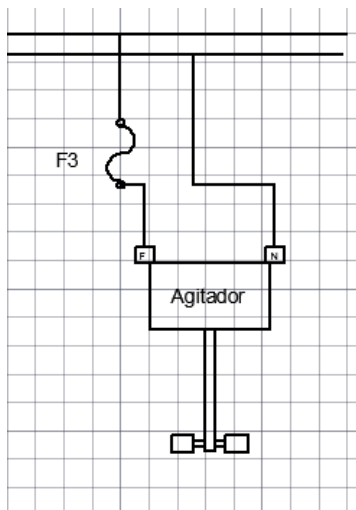


Figura 2.43. Circuito de control Bloque de Relés Ramal 3.

El fusible F3, con características similares a los fusibles F1 y F2 antes mencionados, protege de sobrecorrientes que podrían llegar al agitador, la razón de esta conexión es que el agitador va a estar funcionando todo el momento, desde que se enciende la planta, independiente, del valor de temperatura que se desee controlar, las líneas de alimentación del agitador, van desde la caja de relés hacia la caja de control, donde dicho agitador se encuentra empotrado.

En la parte inferior de la planta, desde la línea de alimentación se ha instalado un tomacorriente, donde se conectarán dos fuentes de corriente continua, una fuente será la que sirve de alimentación para la placa de control, y sus respectivas entradas y salidas, mientras que la segunda fuente, sirve de alimentación para los 4 ventiladores, instalados en la planta.

Se ha visto pertinente el uso de dos fuentes independientes para, que el encendido y apagado de los ventiladores no afecten de ninguna manera a la corriente de

alimentación de la placa de control, y de este modo garantizar una temperatura de medición sin alteraciones.



Figura 2.44. Fuentes de corriente continua conectadas en la Planta.

Las fuentes utilizadas tienen salidas variables de 5V, 7V, 9V, y 12V, para una entrada de 120VAC, una de las razones de haber adquirido estas fuentes es que a un tamaño compacto, brindan una corriente de hasta 2A, luego de varias pruebas se notaba que si la corriente de una fuente era menor a los 2A, comenzaba a darse un error, en las medidas del sensor.

Además como la placa de control tiene un regulador de voltaje, no se podía aplicar un valor de 5VDC directamente a la placa, sino que se debía tener la posibilidad de tener variedad de valores de voltaje mayores a los 5VDC.

Para la alimentación de la placa de control y sus elementos, se aplicó una entrada de 7VDC, mientras que para el control de los ventiladores se aplicó un voltaje de 12VDC. En el presente capítulo se ha presentado una lista detallada de los elementos que conforman el proyecto, tanto los elementos electrónicos de control como los de fuerza,

o de corriente alterna, así como la manera en la que van a ser instalados y puestos en servicio.

En el siguiente capítulo se presentará en detalle cómo el desarrollo del programa del microcontrolador, que pertenece a la placa de control, es muy importante la forma en la que se ha realizado la conexión y la selección de los elementos de la planta, ya que a pesar de tener un programa bien estructurado, de una manera ideal, en el momento de ponerlo en funcionamiento con elementos reales, puede ocasionar muchos problemas que deben ser corregidos a tiempo, con las debidas precauciones.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA

En el capítulo 3, se presentará un análisis de la planta en base a diagramas de flujo, con el fin de conseguir un entendimiento claro, del manejo del proyecto, además se inicia con una explicación del elemento de control a usarse así como los distintos entornos de programación del mismo, dando un énfasis en el lenguaje de programación en C++ que es el que se ha escogido para el control de la planta.

3.1 ELEMENTO DE CONTROL ATMEGA164P

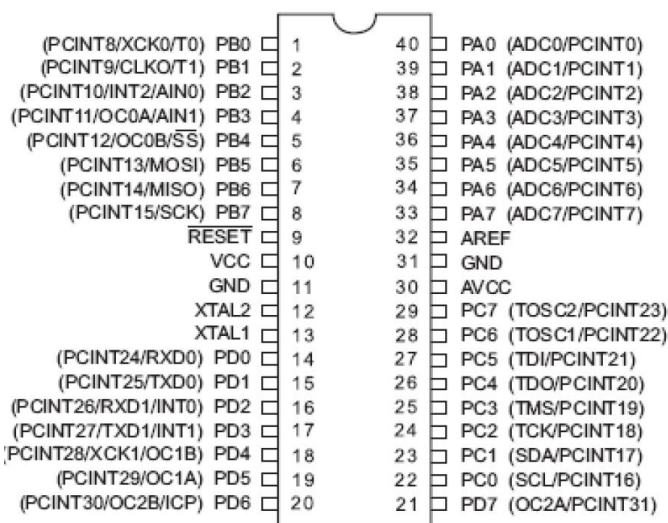


Figura 3.1. Diagrama de pines Microcontrolador Atmega164p

El elemento de control escogido para la planta, es el microcontrolador Atmega164p, puesto que posee los pines suficientes para todas las entradas y salidas deseadas, salidas que serán utilizadas para el control de calentamiento y refrigeración, interrupciones para los pulsadores de selección de temperatura de setpoint, así como los pines para el control del LCD, y finalmente éste microcontrolador es capaz de realizar una comunicación SPI, que es la que se utiliza para obtener los datos desde el sensor de temperatura hacia el microcontrolador.

3.1.1. ANALISIS DE ENTRADAS Y SALIDAS

Las entradas y salidas necesarias son las que se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Categorías de microcontroladores de la familia AVR

NOMBRE	FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
RS	Entrada/Salida	Puerto de lectura y escritura entre el microcontrolador y el LCD
E	Salida	Señal de habilitación, entre el microcontrolador y el LCD
D4	Salida	Línea de BUS de datos entre LCD y microcontrolador
D5	Salida	Línea de BUS de datos entre LCD y microcontrolador
D6	Salida	Línea de BUS de datos entre LCD y microcontrolador
D7	Salida	Línea de BUS de datos entre LCD y microcontrolador
PAD	Entrada	Entrada de calibración de temperatura, conversor A/D
CS	Salida	Activación de comunicación entre Microcontrolador y Transmisor de temperatura por comunicación SPI
SO	Entrada	MISO, envío de información desde el transmisor al microcontrolador por comunicación SPI
CK	Salida	SCK, señal de reloj para sincronización de comunicación SPI
SP+	Entrada	Interrupción para elevación de setpoint
SP-	Entrada	Interrupción para reducción de setpoint
Refri	Salida	Señal de activación del sistema de refrigeración
Cal	Salida	Señal de activación del sistema calentador
Salto	Salida	Señal que indica posible error en la medida
RESET	Entrada	Interrupción de reseteo general del sistema

Luego de realizar el análisis de las entradas y salidas, se optó por utilizar un microcontrolador ATmega164p, por el número de puertos que tiene, número de interrupciones necesarias, conversores análogo digital y comunicación SPI.

Escogido el microcontrolador se realiza una breve explicación, de las características de estos elementos, además se recuerda que el lenguaje de programación seleccionado para programarlo será el lenguaje C++.

3.1.2. FAMILIA AVR

Son microcontroladores de la compañía ATMEL, su estructura diseño, y uso de memorias, los han hecho tener una mayor capacidad de borrado y grabado de programas para su funcionamiento, además de la sencillez en el momento de programarlos.

Las principales categorías de los microcontroladores AVR son las siguientes:

Tabla 3.2. Categorías de microcontroladores de la familia AVR

Categoría	Características
TINY AVR	Memoria Flash hasta 2Kbytes Memoria SRAM y EEPROM hasta 128 Bytes
AVR	Memoria Flash hasta 8Kbytes Memoria SRAM y EEPROM hasta 512 Bytes
MEGA	Memoria Flash hasta 256Kbytes Memoria SRAM y EEPROM hasta 4 Kbytes

Con lo explicado anteriormente, y por la familiaridad con el microcontrolador Atmega164p, es éste el elemento a usarse para el control del Baño Térmico.

3.1.3. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN DE LOS MICROCONTROLADORES ATMEGA.

3.1.3.1.Lenguaje de BASCOM

El entorno de lenguaje Bascom, tiene su propio lenguaje de programación, un lenguaje de programación en alto nivel, con instrucciones y esquemas propios del entorno, el cual facilita el desarrollo de instrucciones para grabarlas en un microcontrolador, pero que por ser de alto nivel, provoca que los puertos e instrucciones utilizadas en el microcontrolador sean transparentes para el usuario, además este tipo de programación ocupa más espacio de memoria, y puede ser menos rápido en las acciones que otros lenguajes de programación.

3.1.3.2. Lenguaje C++

En la programación de microcontroladores de Atmel Corporation, se tiene la opción de programarlos, con el lenguaje C, que es beneficioso, por el hecho de ser un lenguaje común en la programación, así como fácil de manejarlo y entenderlo, inventado por Dennis Ritchie, el lenguaje de programación en C, es beneficioso por el uso de librerías y comandos lógicos para los procesos de programación, los cuales son aplicados perfectamente, en aplicaciones con microcontroladores, ocupa menos espacio de memoria, al programar que el entorno de BASCOM.

3.1.3.3. Assembler

Es un lenguaje de bajo nivel, realizado en base a una secuencia ordenada de pasos y acciones, es el lenguaje utilizado para obtener una alta eficiencia en el caso de microcontroladores, ya que es la representación simbólica más cercana al llamado código de máquina.

Luego de la breve explicación, de los principales lenguajes de programación para microcontroladores, el lenguaje a usarse en el proyecto será C++ para microcontroladores, ya que es un lenguaje que da una buena eficiencia al microcontrolador, y su lógica de programación, favorece a las acciones de control que se deberán tomar.

3.2 DIAGRAMA DE FLUJO

Mediante el comando **#include** se ingresa al programa los archivos **.h** necesarios para el funcionamiento del programa.

Se definen las variables necesarias, para el desarrollo del programa.

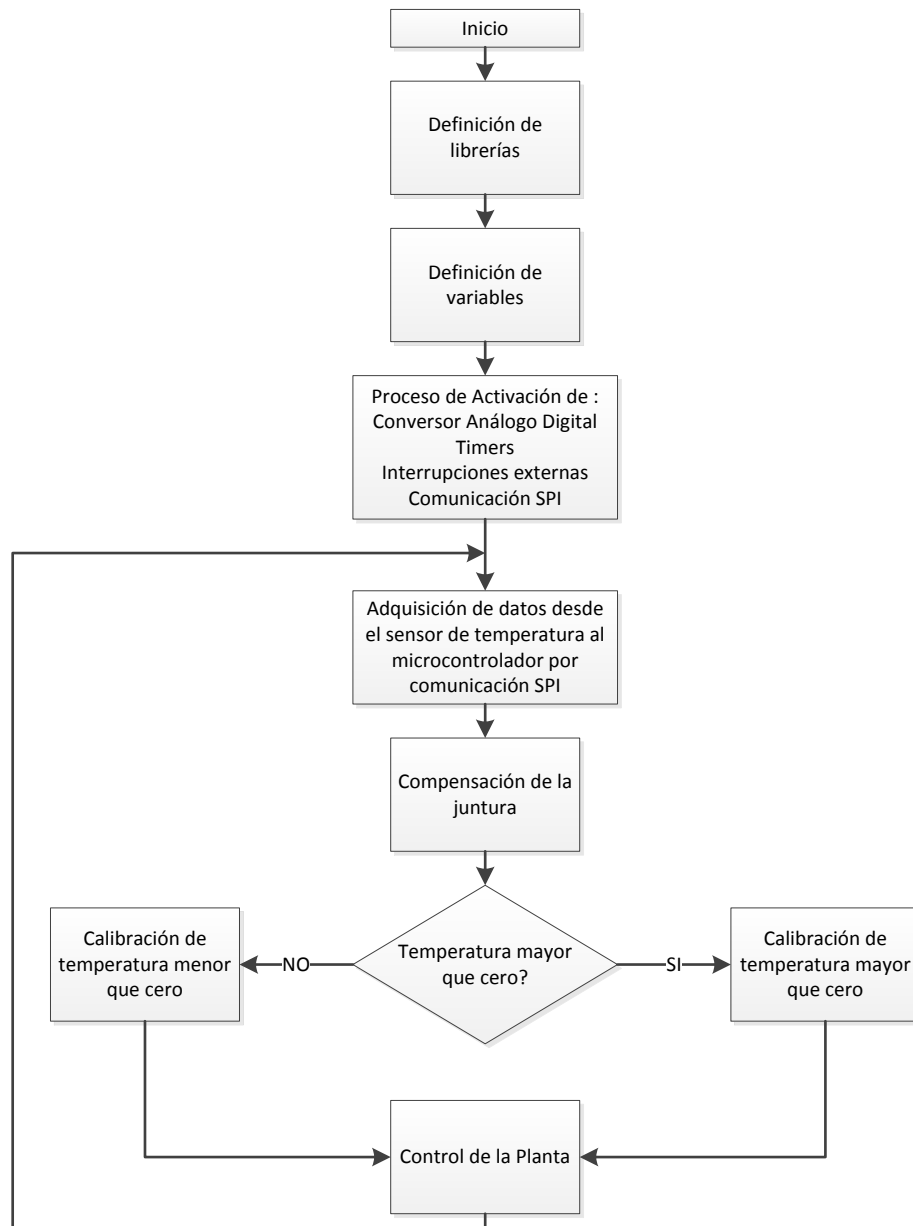


Figura 3.2. Diagrama de flujo principal del programa

Se realiza la configuración necesaria para activar interrupciones y otras actividades como por ejemplo la conversión análoga digital, temporizadores, interrupciones externas y comunicación SPI.

Activada la comunicación SPI, se realiza el proceso de adquisición de datos desde el sensor MAX31855 hacia el Atmega164p, de este modo se obtiene además de la temperatura del termopar, la temperatura de la junta, y datos complementarios.

Se realiza una compensación al valor de temperatura de termopar mediante una pendiente, la cual depende del valor de temperatura de junta, ésta es la conocida compensación de Junta fría.

Si el dato de temperatura recibido, corresponde a un dato menor que cero, se realiza un proceso, y si la temperatura es mayor o igual a cero, se realiza otro, para facilitar el proceso de control. Estos dos procesos son similares, en el hecho que en este punto se debe realizar una compensación al valor de temperatura tomado, mediante una pendiente adquirida por un proceso de calibración.

Luego de obtener un valor de temperatura calibrado, en base a este valor, se realiza un proceso de control de la planta.

A continuación se realizan diagramas de flujo secundarios para una explicación más detallada del programa.

3.2.1. DEFINICIÓN DE LIBRERÍAS

En esta sección del proceso se incluyen ciertos archivos que el programa necesita para realizar acciones específicas.

- <avr/io.h>: Este archivo contiene información del microcontrolador usado, como sus puertos, número de pines, etc..
- "config.h": Contiene principalmente la frecuencia a la que el microcontrolador va a trabajar.

- "lcd.h": Es el archivo encargado de realizar los procesos de activación y control de un LCD.
- "lib1.h": Archivo que inicializa acciones de conversión análogo digital y protocolos de comunicación.
- <avr/interrupt.h>: Para el manejo de interrupciones.
- <util/delay.h>: Generador de retardos o espera en el programa.
- <math.h>: Función de C++, sirve para realizar operaciones matemáticas más complejas como, raíz cuadrada, funciones trigonométricas, etc..

3.2.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES.

Aquí se escribirán todas las variables necesarias para el manejo del programa, como la variable donde se almacena el valor de la temperatura, donde se almacena el valor de setpoint, variables para compensación de temperatura, contadores, y variables de manejo de puertos.

3.2.3. PROCESO DE ACTIVACIÓN DE ACCIONES

En la Figura 3.3 Se presenta el diagrama de flujo con las acciones del microcontrolador que son usadas en el proyecto y los puertos que se deben manejar.

La conversión análogo digital es utilizada para calibrar la pendiente de compensación de la temperatura, el temporizador es utilizado, para realizar un mejor control sobre la resistencia de calentamiento del sistema, ya que si se utiliza un control on-off, en el momento de apagar el sistema calentador al llegar a la temperatura de setpoint, la temperatura del líquido va a superar en una cantidad alta la temperatura de setpoint, y así nunca se va a lograr tener un valor adecuado, así que gracias al temporizador se pudo tener un control variable a medida que se acerca la temperatura al setpoint. Las interrupciones externas se usaron para programar el valor de setpoint, y la

comunicación SPI, es la parte fundamental de estas acciones ya que sin este proceso no se puede obtener el valor de temperatura del sensor, así como datos de error y temperatura de la junta.

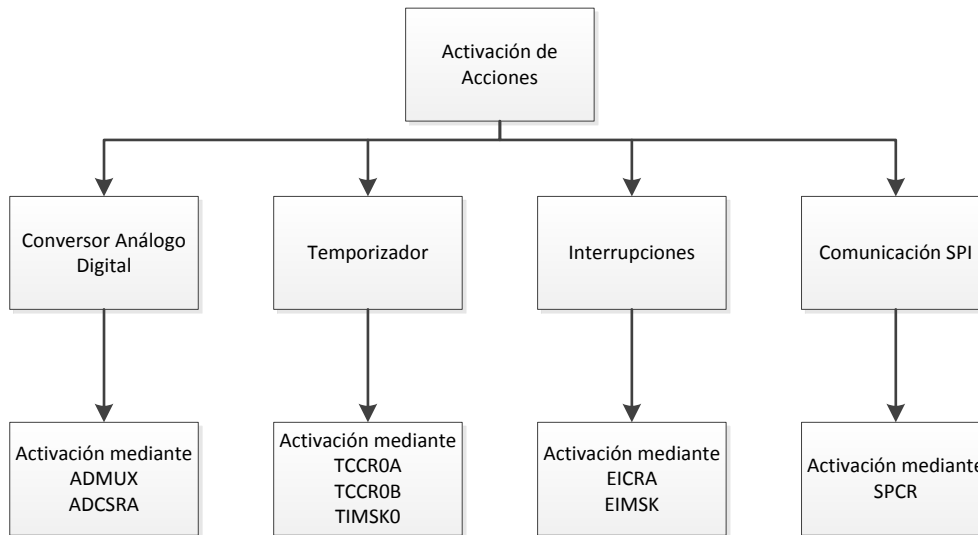
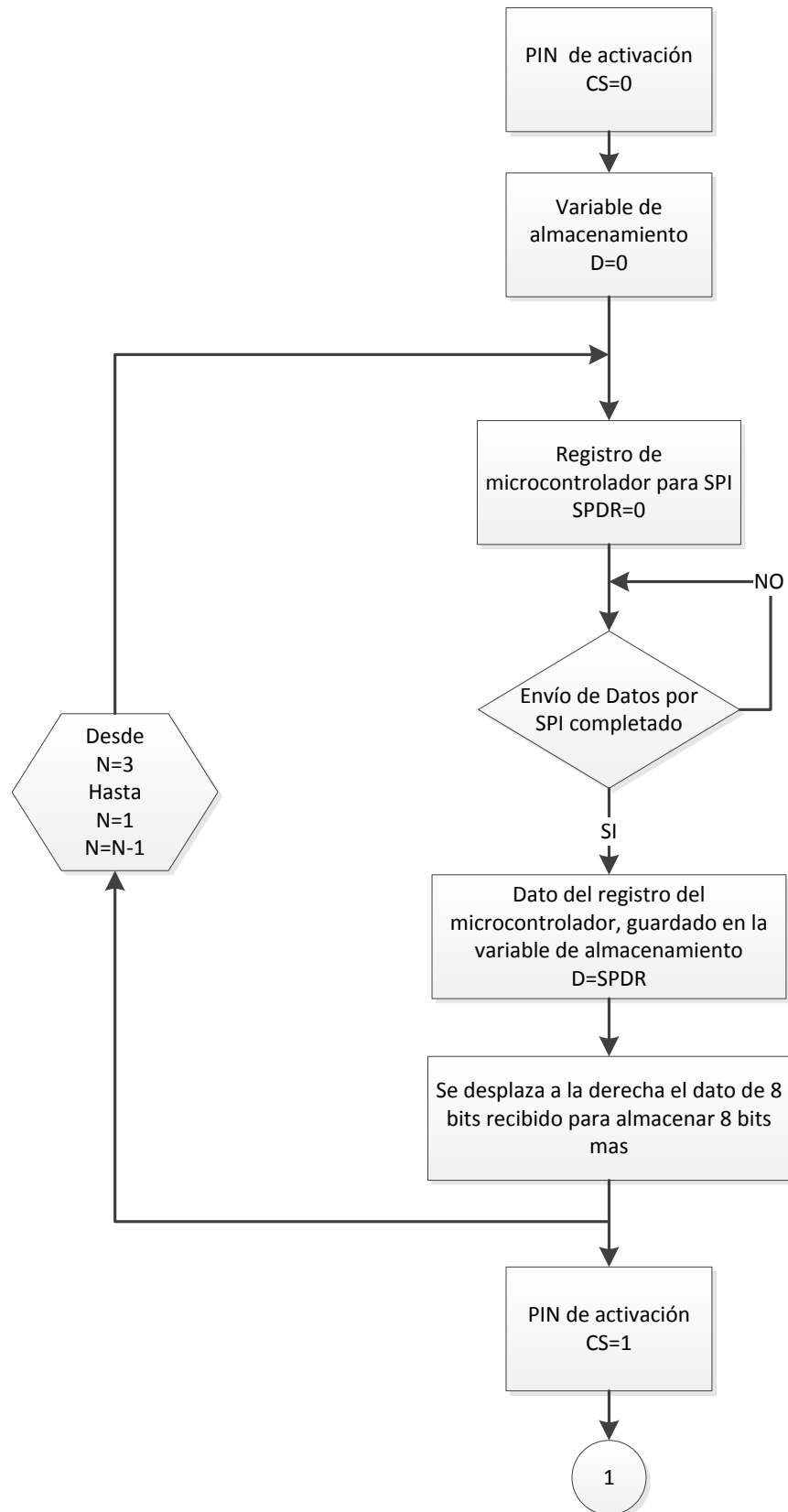


Figura 3.3. Diagrama de Flujo de Activación de Acciones

3.2.4. ADQUISICIÓN DE DATOS DESDE MAX31855 A ATMEGA164P POR COMUNICACIÓN SPI

Primero se debe enviar un valor de 0L por un pin hacia el sensor MAX31855, este valor es CS de la comunicación SPI, el cual comienza la comunicación, e inicializa la señal de reloj que sale del microcontrolador al sensor. El transmisor de temperatura almacena los datos de temperatura en un registro de 32 bits que es la cantidad de bits que envía el sensor.

El SPDR es el registro por donde se envía o se recibe una información de 8Bits, por seguridad se coloca un valor de cero en este registro antes de comenzar a recibir la información.



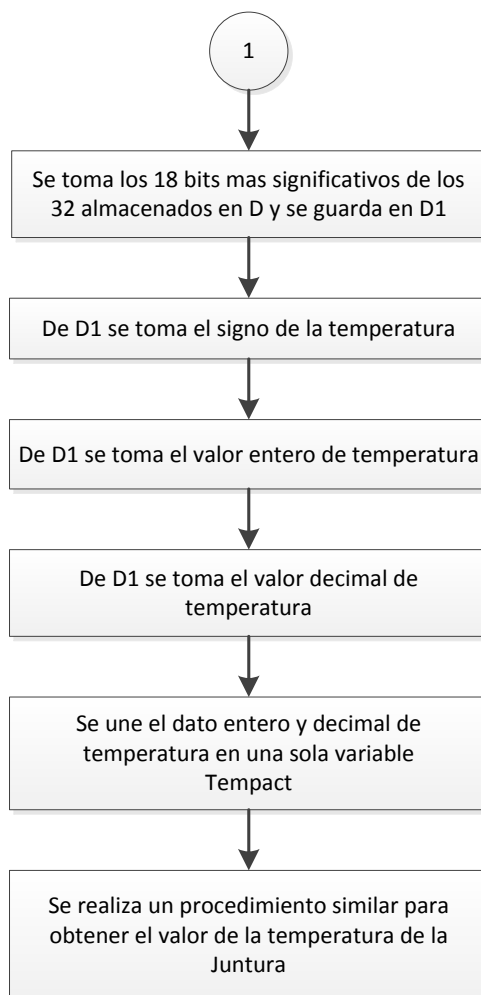


Figura 3.4. Diagrama de flujo de la adquisición de datos desde MAX31855 al Atmega164p por comunicación SPI.

Con todos los parámetros explicados anteriormente, la recepción del dato por parte del microcontrolador comienza, y hasta que 8 bits de datos del sensor no lleguen hasta el registro SPDR, el proceso se mantiene en espera. Cuando se haya completado la recepción, el dato del registro SPDR se guarda en el registro creado “d”.

Este procedimiento se realiza por cuatro ocasiones, ya que como se explica anteriormente, el dato enviado por el MAX31855, es un dato de 32Bits de tamaño, y el registro de comunicación SPI es únicamente de 8Bits, por tanto se toma el dato en cuatro partes desde el más significativo hasta el menos significativo, cada que se

almacena el dato del SPDR al “d”, se desplaza el dato 8Bits, hacia la izquierda para que se almacene los siguientes 8Bits en el mismo registro, luego de terminado el proceso el dato de 32Bits, se encuentra almacenado en el registro “d”.

Cuando el dato se ha recibido y se ha almacenado, el pin de CS vuelve a 1L para que el MAX31855 no continúe enviando información. Según el mapa de Bits del sensor, tiene un conjunto de información que debe ser adquirida de una manera correcta para poderla utilizar eficientemente.

Tabla 3.3. Mapa de Datos del MAX31855

BIT	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
D[31:18]	14 Bits de dato de la Termocupla	Son 14 Bits del dato de temperatura que da la Termocupla
D17	Reservado	Siempre deberá ser cero
D16	Falla	Se leerá 1L cuando exista alguna falla en SCV, SCG u OC
D[15:4]	12 Bits de dato de la temperatura interna	Dato de la temperatura en la juntura
D3	Reservado	Siempre deberá ser cero
D2	SCV Falla	Se leerá 1L cuando exista un corto circuito en VCC, caso contrario se lee 0L
D1	SCG Falla	Se leerá 1L cuando exista un corto circuito en GND, caso contrario se lee 0L
D0	OC Falla	Se lee 1L cuando la termocupla nos está bien conectada

La adquisición del dato de temperatura ambiente y de la temperatura de la juntura es similar así que se explicará únicamente uno de los dos.

Como se explica en el mapa de datos de la tabla, la información de la temperatura ambiente o del termopar, se encuentra en los bits desde el número 18 hasta el 31, por tanto del dato obtenido en el registro “d”, se lo copiará en otro registro “d1” para no alterar al original, el dato almacenado en este registro recorrerá 18 posiciones hacia

la derecha, y con eso se tendrá el dato de la temperatura únicamente, de éste registro saldrán tres registros más, el valor entero de la temperatura, el valor decimal de temperatura y el signo; se separan estos datos, puesto que la interpretación, del valor entero de temperatura no es igual a la interpretación, en decimal, y además se necesita el signo de la temperatura para un posterior control. La adquisición de la temperatura de la junta fría es, como se explicó anteriormente similar.

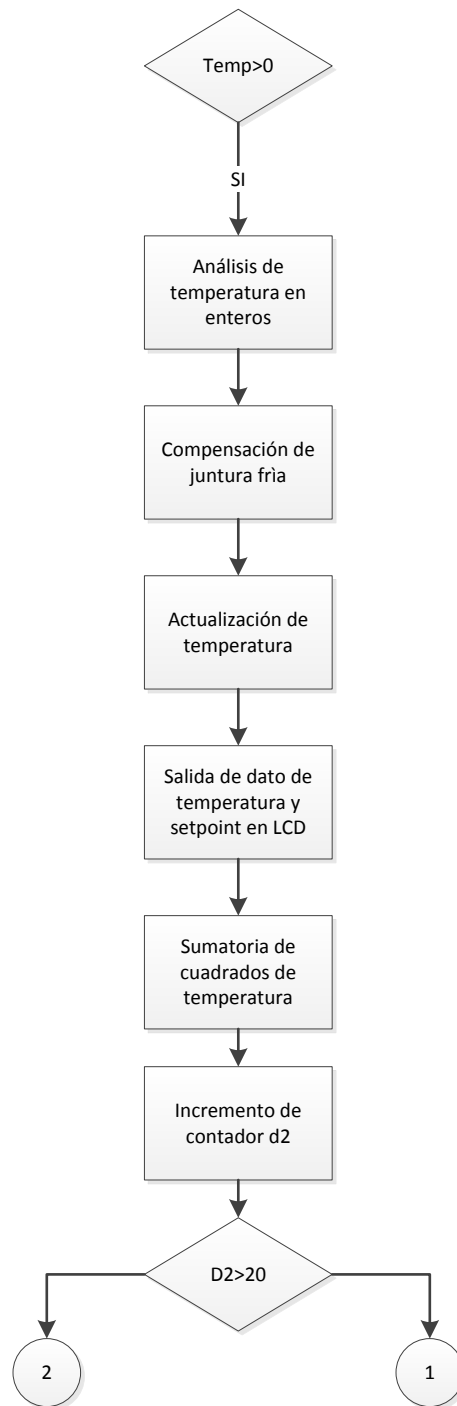
3.2.5. COMPENSACIÓN DE LA JUNTURA

Se realiza una ecuación lineal en base a la temperatura de la junta, valor adquirido anteriormente, este resultado será restado al valor de temperatura del termopar, luego de realizar pruebas se notó que en el momento que la temperatura ambiente variaba, también variaba la temperatura del termopar, a pesar que la temperatura aplicada en el termopar era constante. En base a resultados obtenidos con un patrón de medida se pudo obtener que el valor de la diferencia entre la temperatura del sensor de la planta y el sensor patrón aumentaba a medida que aumentaba la temperatura ambiente, es decir que se tenía un error positivo, proporcional a la temperatura de la junta, error que es obtenido en esta parte del proceso.

3.2.6. CALIBRACIÓN DE TEMPERATURA MAYOR QUE CERO

Para comenzar la explicación del presente proceso, se toma en cuenta dos registros principales, el registro "Tempact" es aquel que tiene almacenado el valor de la temperatura medida en el termopar, mientras que el registro "Tempact1", es con el que se realiza el control de la planta, el registro Tempact1 y Tempact, dependen entre sí y en ciertas partes del proceso tendrán el mismo valor.

Como en el proceso anterior, se almacenó el signo de la temperatura medida en un registro, se verifica si la temperatura es mayor o menor que cero, en el caso de tenerse una temperatura mayor que cero, se realiza el proceso de la Figura 3.5.



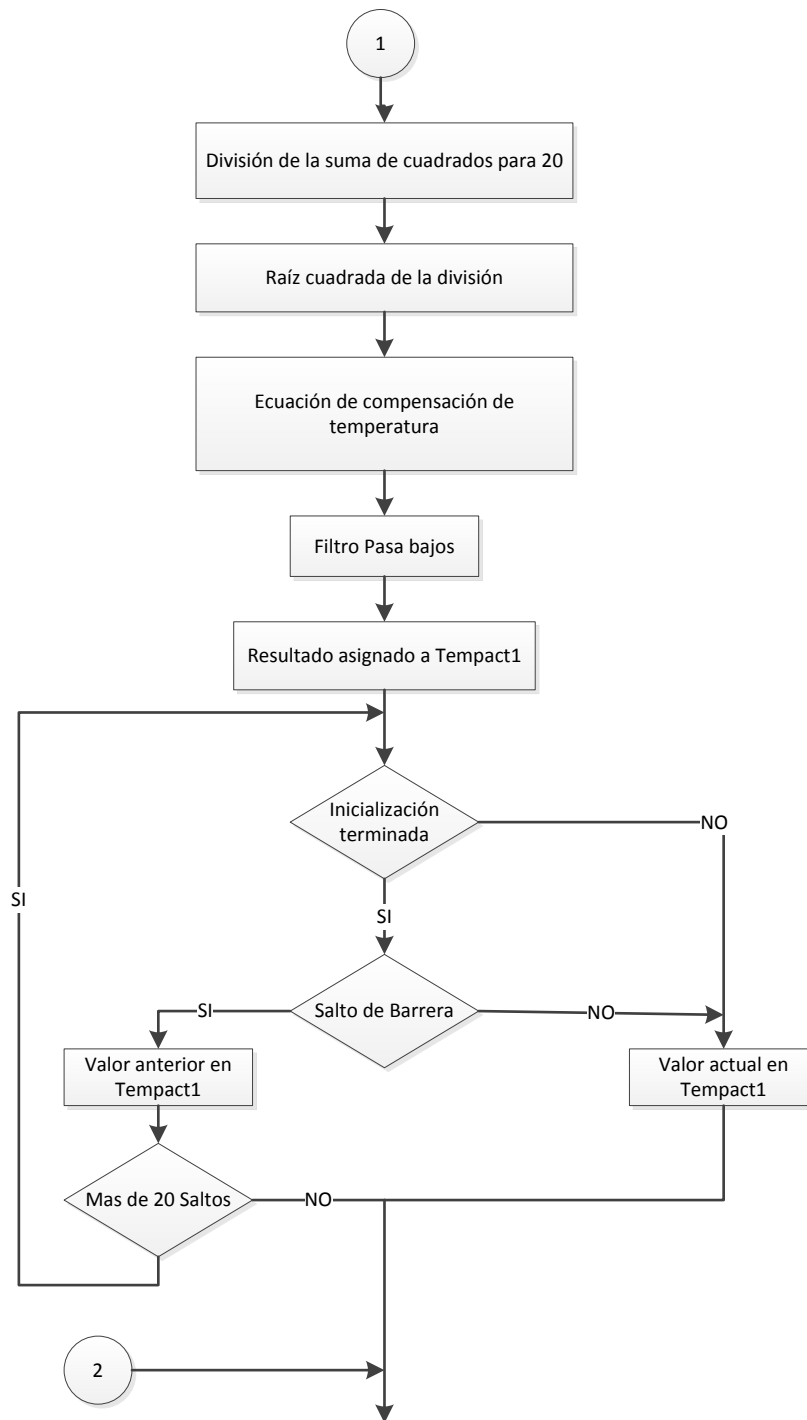


Figura 3.5. Diagrama de flujo de la calibración de temperatura mayor que cero

Para un adecuado manejo de la temperatura del termopar, el valor total de la misma se lo maneja en entero, es decir si se tiene una temperatura de 17.15 °C, el microcontrolador manejará un valor de registro de 1715, sin decimales.

El valor obtenido por la compensación de juntura fría es restado al valor de temperatura del termopar obtenido.

El valor de Tempact1 es presentado en el LCD junto con el valor de temperatura de setpoint, se entiende que este registro contiene una temperatura de termopar corregida, inicialmente Tempact1 tendrá un valor de cero.

El valor de Tempact es elevado al cuadrado y almacenado en un registro, y en el siguiente proceso cuando se tome otro nuevo valor de temperatura de termopar en Tempact, también es elevado al cuadrado y sumado al anterior, y así sucesivamente hasta que un contador llegue a 20, es decir hasta que se tenga una sumatoria de veinte datos de temperatura elevados al cuadrado.

Si el contador no llega a 20 se sigue realizando la sumatoria de cuadrados antes mencionada, y el valor de Tempact1 no se altera y sigue siendo el mismo, si el contador llega a 20, la sumatoria de cuadrados es dividida para 20 y de ese resultado se obtiene la raíz cuadrada, obteniendo así un valor de temperatura promedio con menor error, por el método de mínimos cuadrados, recomendado por la NIST, en su artículo NIST5340 [9].

Si bien este valor de temperatura tiene una menor variación u oscilación, en las primeras pruebas obtenidas se pudo notar que tenía un error variable proporcional a la temperatura medida.

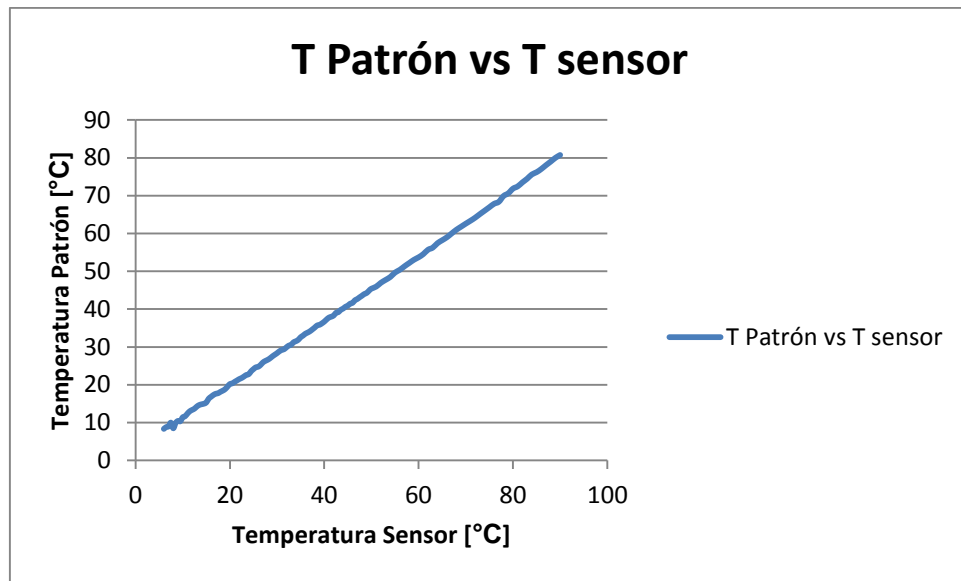


Figura 3.6. Temperatura Patrón vs Temperatura de Sensor

Con las pruebas obtenidas con toma de datos desde los 6°C hasta los 90°C, en rangos de 1°C, se pudo obtener una recta correspondiente al error en función de la temperatura del sensor.

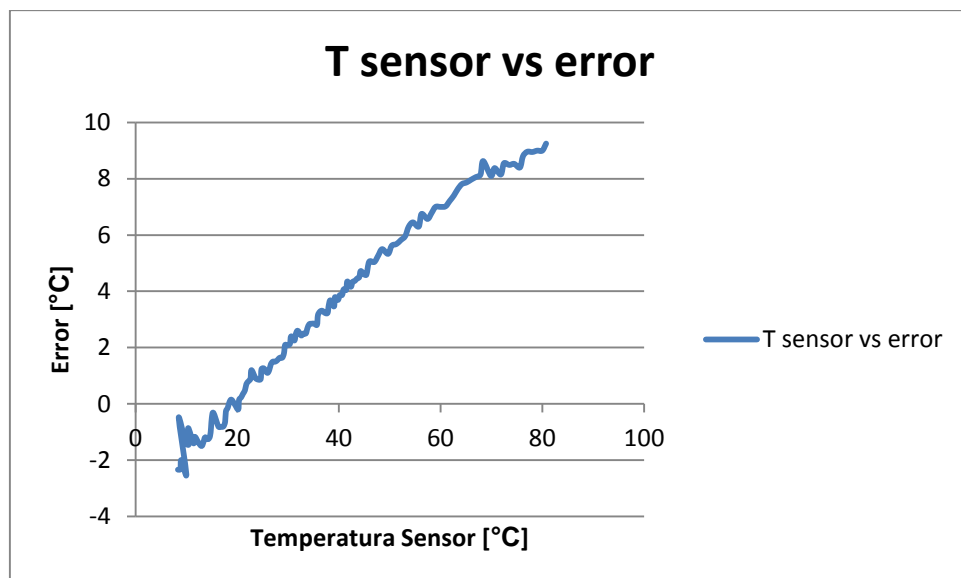


Figura 3.7. Temperatura de Sensor vs Error

Con estas pruebas se pudo concluir que la manera de corregir el error variable de la temperatura en diferentes valores, es sumando el error correspondiente, el cual se obtiene a través de la ecuación de la recta correspondiente a la gráfica, pero para una corrección mayor, se encontró el punto en el que el valor del sensor y el del patrón son el mismo, y con ese punto y una pendiente variable a través de una entrada análoga se pudo obtener una temperatura cercana del patrón de medida en un error de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, que es lo que se propuso en los alcances del proyecto.

Luego de compensada la temperatura se le aplica un filtro pasa bajos, para evitar posibles oscilaciones, este valor obtenido es colocado en el registro Tempact1.

En este punto inicialmente terminaba todo el proceso de corrección de temperatura, pero luego de realizar más pruebas se observó que en ciertos momentos por error del sensor, se tenían saltos de temperatura elevados que no tenían nada que ver con el valor en el instante, es por eso que se creó el algoritmo de barrera de saltos.

En el momento que existe un salto de temperatura, el programa descarta este valor y se mantiene con el valor de temperatura anterior, y si existe más de 20 de estos saltos, el programa realiza un proceso de inicialización, que también ocurre cuando se enciende todo el sistema, este proceso de inicialización, toma más datos y no realiza tantas correcciones, hasta obtener una estabilidad mejor en el sistema, que luego de realizar pruebas se pudo notar que se obtiene luego de 100 tomas de datos.

Si no ocurriera un salto de dato de la barrera de seguridad este dato es colocado en el Tempact1, caso contrario como ya se mencionó el valor que iría al Tempact1 sería el dato anterior, al salto.

Realizado todo el proceso para obtener una temperatura mayor que cero corregida, comienza el control de la planta.

3.2.7. CALIBRACIÓN DE TEMPERATURA MENOR QUE CERO

Este proceso no se explica con detenimiento puesto que es muy similar al proceso de calibración de temperatura, para valores mayor que cero, la única diferencia es que en el caso anterior se restaba la compensación, en este caso se la debe sumar, y también hay que tomar en cuenta que las respectivas correcciones de temperatura se las hace como si el valor o dato de registro fuera positivo, en el momento que se termina las correcciones, se coloca el valor negativo, en el registro de temperatura, para de ahí comenzar el proceso de control de la planta.

3.2.8. CONTROL DE LA PLANTA

Luego de obtener un valor de temperatura corregido, se puede comenzar a controlar todo el sistema, el usuario u operario mediante pulsadores puede colocar el valor de temperatura a la cual desea mantener el líquido de la planta, este valor colocado mediante pulsadores es el setpoint, con un pulsador aumentará el valor de setpoint y con el otro pulsador lo disminuirá.

Primero el programa verifica qué valor es el que se ha adoptado como valor de setpoint, ya que dependiendo de este valor, el elemento de control de temperatura varía. Si el operario colocara un valor de temperatura de setpoint superior a los 23°C, el sistema es controlado por el calentador.

En este momento se comprueba si la temperatura a la que se encuentra el líquido de la planta es mayor al de setpoint más valor de histéresis, histéresis que depende de la temperatura que se vaya a controlar y va desde un mínimo de 0.4°C hasta 0.8°C, si es éste el caso, se debe abrir el relé que controla el flujo de corriente a la resistencia de calentamiento de titanio o calentador, para que éste deje de calentar al líquido, si no fuera el caso pasa directamente al siguiente subproceso.

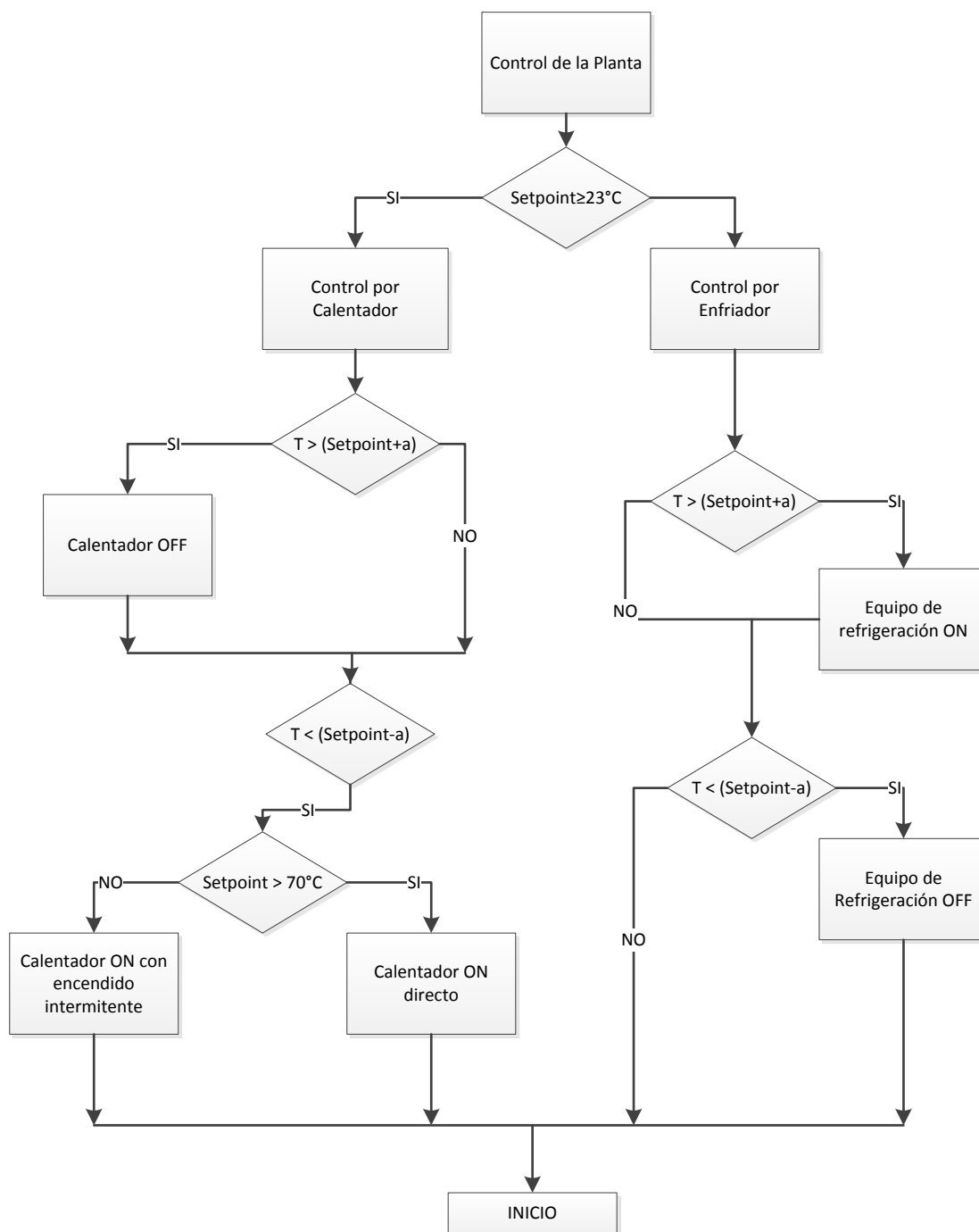


Figura 3.8. Diagrama de Flujo del Control de la Planta

Si la temperatura del líquido no es mayor a la de setpoint, el programa enciende el calentador pero de un modo particular, para llegar a la temperatura deseada no se

puede mantener todo el tiempo el calentador encendido hasta llegar a dicha temperatura ya que hasta que se apague el calentador, éste habrá calentado más el líquido de la planta de lo que se deseaba, así que hasta llegar a la temperatura se realiza un encendido intermitente a un periodo constante de 3 segundos, periodo que fue tomado al calcular en base a pruebas del tiempo que necesita la resistencia térmica para aumentar 1°C a todo el líquido de la planta, y a medida que la temperatura del líquido se acerca a la de setpoint, el tiempo de encendido del calentador en el periodo es menor, con esto se procura que la temperatura no se eleve demasiado.

Si el setpoint es, colocado a una temperatura menor a los 23°C, el control de temperatura se lo realiza con el equipo de refrigeración, si la temperatura del sensor es mayor al setpoint más un valor de histéresis, el equipo de refrigeración se enciende, caso contrario el programa verifica si el valor de la temperatura es menor al de setpoint, si fuera el caso se entiende que el líquido esta enfriado más de lo deseado, por tanto se desactiva el sistema de refrigeración. Para la utilización del equipo de refrigeración no se realiza un encendido intermitente puesto que es un sistema más complejo y el encendido y apagado rápido puede dañar al compresor del sistema de refrigeración, además la refrigeración se da en un tiempo mayor, que el calentamiento, por tanto no se corre el riesgo de obtener una temperatura más baja a la temperatura deseada si se lo deja encendido por más tiempo.

3.2.9. INTERRUPCIONES INTERNAS Y EXTERNAS

La primera interrupción externa se obtiene, a través del INT0 y se presenta mediante un pulsador, el cual al ser presionado, aumentará el valor del setpoint, recordando que el valor que se coloque en este registro, es la temperatura a la que el sistema debe estabilizarse.

La interrupción externa INT1 es similar a la de INT0, pero ésta interrupción se presenta para disminuir el valor de setpoint.

La interrupción TIMER1 es una interrupción interna y corresponde al TIMER, previo a la explicación del programa en el momento de la interrupción, se recuerda que este Timer está programado hasta el desborde, o hasta el número máximo del registro.

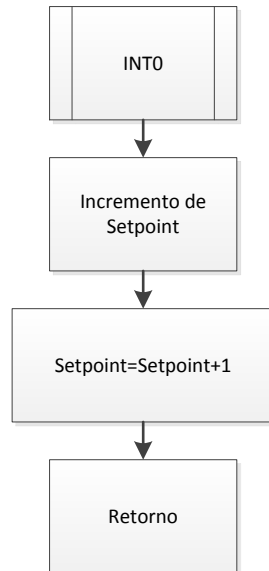


Figura 3.9. Interrupción Externa INT0

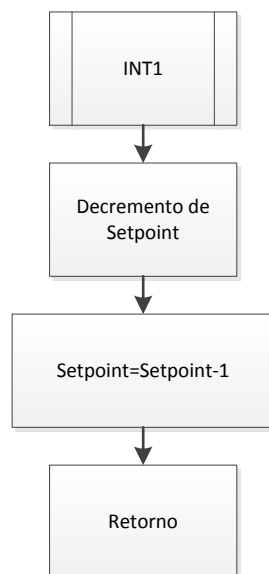


Figura 3.10. Interrupción externa INT1

En el momento que se tiene un desborde se presenta una interrupción interna, y comienza el proceso para controlar el encendido y apagado del calentador.

Primero se incrementa un contador D5 que inicialmente se encuentra en cero, Lo siguiente es preguntar si D5 es mayor a 150, que es un valor de contador equivalente a un tiempo entre 0.5 y 1 segundo, si efectivamente el contador es mayor a 150, se regresa el contador a cero, este tiempo es el periodo, de encendido apagado del calentador.

Si el contador D5 aún no llega a 150, se realiza el siguiente análisis el cual verifica si el valor en el instante de D5 es mayor o menor a un valor proporcional a la diferencia entre el setpoint y el valor de la temperatura del sensor.

Gracias a éste análisis, se puede tener una variación en el encendido del calentador, ya que si el líquido de la planta tiene un valor de temperatura mucho menor, al setpoint, es decir una temperatura menor a la que se desea, el calentador se encenderá constantemente y a medida que la temperatura del líquido de la planta se aproxima al setpoint, el tiempo de encendido del calentador es menor en un periodo de tiempo para de esta manera llegar al valor adecuado con más precisión.

La adquisición de datos desde una entrada análoga es la última interrupción usada, y fue creada para poder realizar una calibración de la temperatura del sensor de una manera más efectiva y rápida, el valor tomado desde ésta adquisición se convierte en el programa, en la pendiente de la recta de compensación de la temperatura.

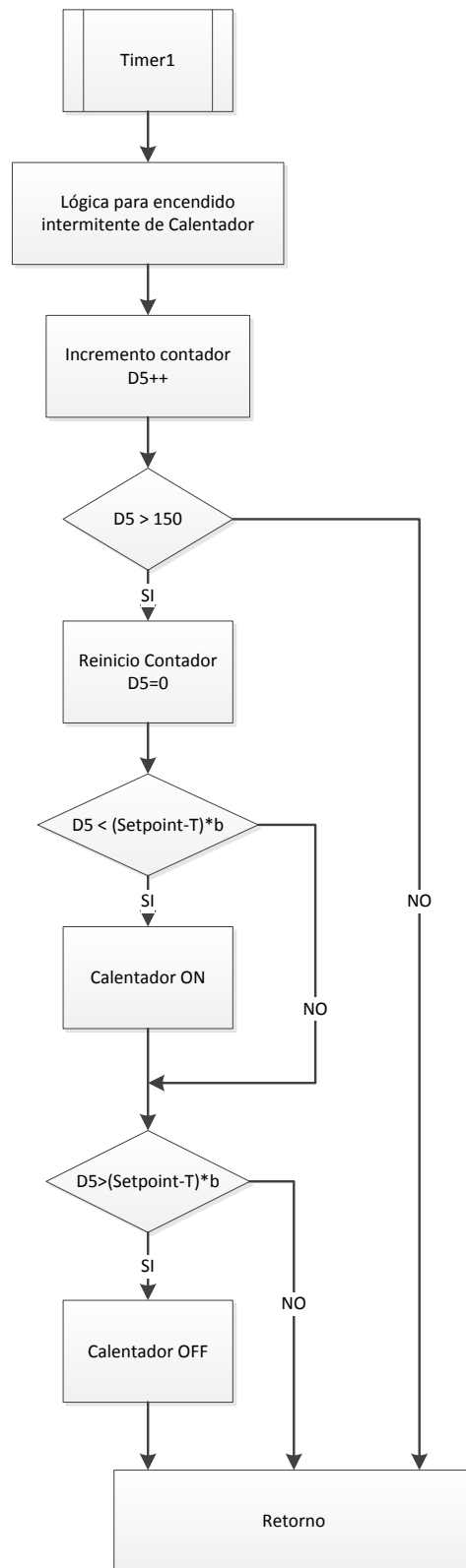


Figura 3.11. Diagrama de flujo de uso de Timer.

$$T' = T - \left(\left(\frac{Dato_{adc}}{1000} \right) \times T - (E \times Dato_{adc}) \right) \quad (3.1)$$

Dónde:

T= Valor de temperatura adquirido por el sensor

Dato_adc= Valor adquirido por el conversor Análogo Digital

E= constante proporcional al valor de la temperatura donde el valor del sensor y del patrón son iguales.

T'=Temperatura calibrada.

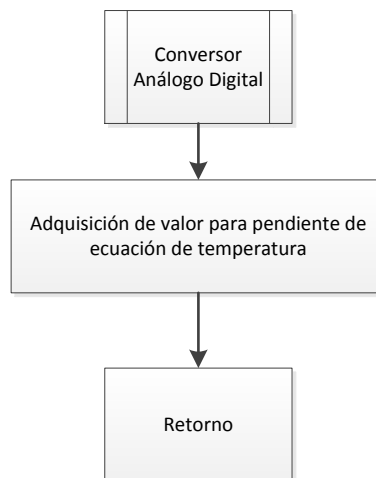


Figura 3.12. Uso del conversor Análogo Digital

CAPÍTULO 4.

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan las pruebas que se realizaron en la planta, y los resultados que se fueron obteniendo hasta llegar a cumplir con los alcances previamente establecidos.

4.1. PRUEBAS DE TIEMPO DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO DEL LÍQUIDO CONTROLADO DENTRO DE EL ENVASE.

Antes de que estuviera instalado el sistema automático de control de la temperatura, se realizó un número de pruebas para poder ver el tiempo que el envase con el etilenglicol, tardaba en cambiar de temperatura.

El resultado de estas pruebas sirve para ver la capacidad del envase de mantener una misma temperatura en un tiempo determinado, y cuanto se demora en llegar de un valor de temperatura a otro.

4.1.1. CALENTAMIENTO DE LA PLANTA SIN SISTEMA CALENTADOR EN EL TIEMPO

Se realizó un enfriamiento de la planta, desde una temperatura ambiente, hasta un valor de -10°C , y en ese momento, se dejó de controlar el líquido dentro de la planta, y quedó en funcionamiento únicamente el agitador, para que exista un valor homogéneo de temperatura. Se inició un cronómetro y se fue tomando datos del tiempo en minutos, por cada grado centígrado que el líquido subía desde los -10°C hasta 20°C , dichos valores fueron guardados en la tabla 4.1 con el tiempo exacto en el que fue realizada la toma de la medida.

Como se puede observar en la Figura 4.1 el calentamiento toma una forma exponencial, es decir que a temperaturas bajas el sistema cambia de temperatura

rápidamente, pero a medida que la temperatura aumenta en el líquido, el calentamiento se dará en un tiempo mayor.

Tabla 4.1. Valores Temp Vs Tiempo, de calentamiento sin sistema calentador en la planta.

Temperatura °C	Tiempo Min	Temperatura °C	Tiempo Min
-10	0	6	89
-9	2	7	96
-8	4	8	105
-7	7	9	119
-6	11	10	131
-5	16	11	141
-4	21	12	164
-3	27	13	184
-2	33	14	202
-1	39	15	236
0	46	16	258
1	53	17	365
2	60	18	405
3	64	19	438
4	70	20	491
5	78		

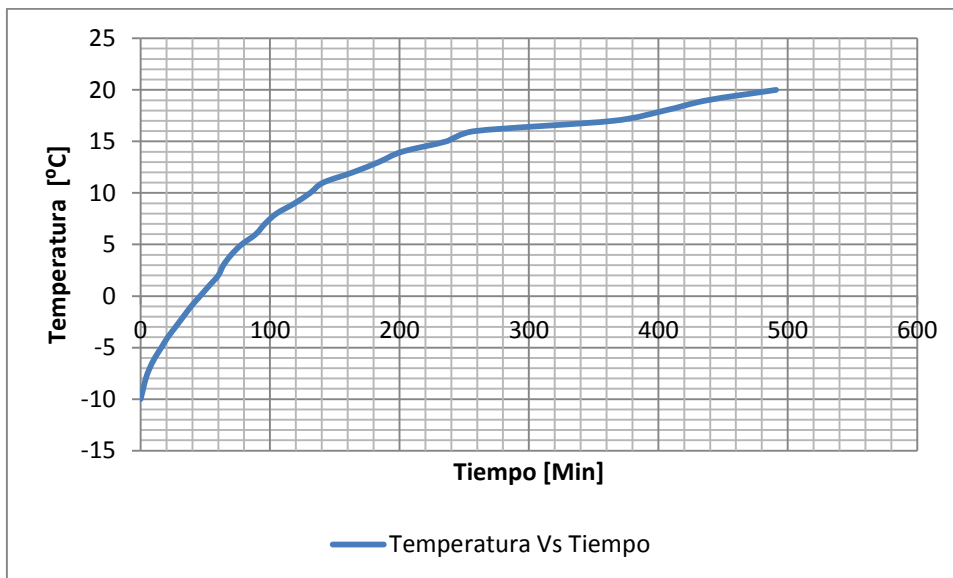


Figura 4.1. Temp Vs Tiempo, de calentamiento sin sistema calentador en la planta.

Lo que indicaría que si se desea realizar pruebas a temperaturas muy bajas se debe encender y apagar el sistema de refrigeración a una frecuencia mayor que en temperaturas más altas.

4.1.2. ENFRIAMIENTO DE LA PLANTA SIN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN EL TIEMPO

Se procedió a calentar el líquido de la planta, hasta llegar a una temperatura de 120 °C, a partir de esta temperatura se dejó que el líquido se enfriara sin control alguno hasta llegar a una temperatura casi estable en el transcurso del tiempo, y estos fueron los resultados obtenidos, tomando los datos del tiempo cada 5°C.

A partir de los datos de tabla 4.2, y la figura 4.2, se nota que a partir de 120 °C, existe una disminución prácticamente constante al inicio a una tasa de 1°C cada dos o tres minutos, tiempo que es amplio y puede ser controlado por los sistemas para calentar el líquido, y a medida que disminuye la temperatura, la reducción de la misma se da en un tiempo más amplio.

Tabla 4.2. Temp Vs Tiempo, enfriamiento de la planta sin sistema de refrigeración.

Temperatura °C	Tiempo Min	Temperatura °C	Tiempo Min
120	0	70	60
115	3	65	73
110	7	60	90
105	11	55	108
100	13	50	133
95	19	45	165
90	24	40	205
85	29	35	262
80	39	30	297
75	49	24,8	538

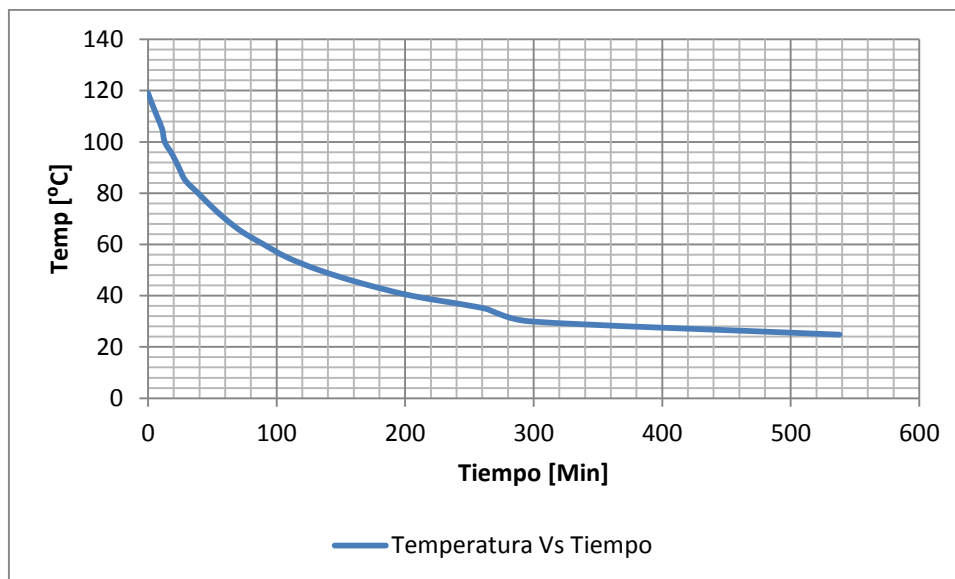


Figura 4.2. Temp Vs Tiempo, enfriamiento de la planta sin sistema de refrigeración.

4.1.3. CALENTAMIENTO DE LA PLANTA CON SISTEMA CALENTADOR.

Esta prueba fue realizada para comprobar la rapidez del sistema de calentamiento de la planta. Primero se descendió a -10°C con el sistema de refrigeración, y luego se encendió permanentemente el sistema calentador, hasta llegar a los 120°C , tomando valores de temperatura en cierto periodo de tiempo, y los resultados de la prueba se presentan en la Tabla 4.3 y Figura 4.3.

Tabla 4.3. Calentamiento de la Planta con Sistema Calentador en función del tiempo.

Temperatura [°C]	Tiempo [Min]	Temperatura [°C]	Tiempo [Min]	Temperatura [°C]	Tiempo [Min]
-10	0	35	17,56	79	36,05
-9	0,5	36	17,88	80	36,3
-7	0,92	37	18,18	81	36,55
-6	1,16	38	18,51	82	37,2
-5	1,33	39	18,85	83	37,4
-4	1,63	40	19,5	84	38,05
-3	1,81	41	19,93	85	38,3
-2	2,11	42	20,13	86	38,5
-1	2,4	43	20,5	87	39,2
0	2,33	44	20,88	88	39,45
1	3,22	45	21,3	89	40,1
2	3,52	46	21,85	90	40,35

Temperatura [°C]	Tiempo [Min]	Temperatura [°C]	Tiempo [Min]	Temperatura [°C]	Tiempo [Min]
3	3,73	47	22,52	91	41,05
4	4,25	49	23,07	92	41,3
5	4,63	50	23,36	93	41,55
6	4,83	51	23,75	94	42,3
7	4,17	52	24,37	95	43
8	5,43	53	25,75	96	43,3
9	5,75	54	26,17	97	44
10	6,02	55	26,5	98	44,3
12	6,55	56	26,83	99	45,05
13	6,86	57	27,33	100	45,4
14	7,41	58	27,66	101	46,1
15	7,75	59	28,33	102	46,4
16	8	60	28,75	103	47,1
17	8,35	61	29,25	104	47,45
18	8,68	62	29,67	105	48,15
19	9,05	63	30	106	48,5
20	9,31	64	30,2	107	49,25
21	9,63	65	30,46	108	50
22	9,96	66	31,05	109	50,4
23	10,33	67	31,3	110	51,15
24	11	68	31,52	111	51,5
25	11,45	69	32,17	112	52,3
26	14,4	70	32,3	113	53,1
27	14,83	71	32,55	114	53,45
28	15,16	72	33,2	115	54,25
29	15,67	73	33,4	116	55
30	16,1	74	34,05	117	55,4
31	16,5	75	34,25	118	56,3
32	16,66	76	34,5	119	57,15
33	16,93	77	35,15	120	58
34	17,25	78	35,4		

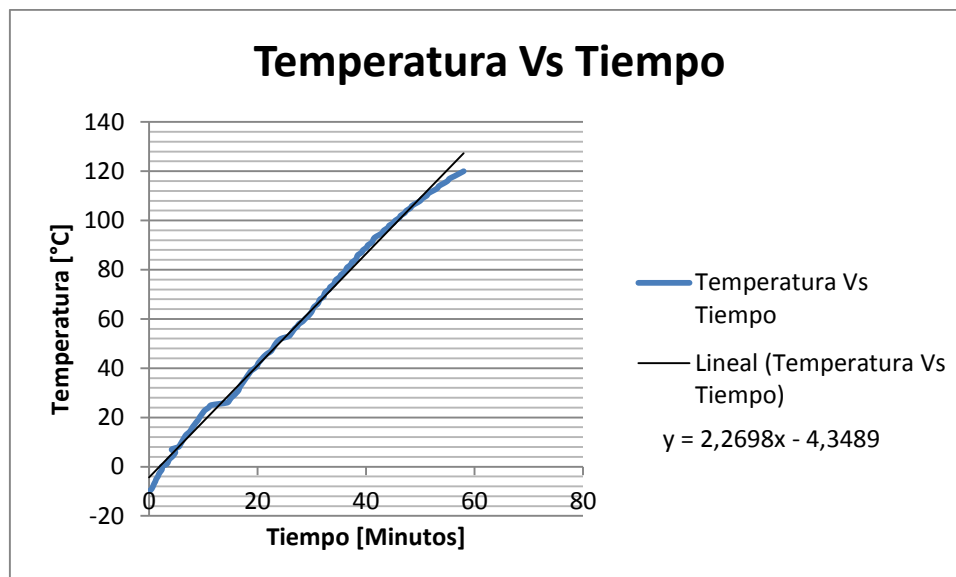


Figura 4.3. Calentamiento de la planta con Sistema Calentador en función del tiempo.

4.1.4. ENFRIAMIENTO DE LA PLANTA CON SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

Para probar el sistema de refrigeración, se calentó el líquido de la planta hasta 120°C, que es el valor más alto al que se pretende llegar, en el momento que el líquido de la llega a dicha temperatura, se enciende el sistema de refrigeración y se comienza a tomar datos de temperatura en el tiempo hasta llegar a -10°C, que es el valor de temperatura más bajo que se desea controlar en la planta.

Llegado a la temperatura más baja se procesan los datos y el resultado obtenido es el de la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Enfriamiento de la planta con Sistema de Refrigeración.

Temperatura [°C]	Tiempo [Min]	Temperatura [°C]	Tiempo [Min]	Temperatura [°C]	Tiempo [Min]
120	0	76	22,92	32	51,3
119	0,5	75	23,5	31	51,85
117,5	1	74	24,17	30	52,5
116,5	1,67	73	24,92	29	53,08
115,5	2	72	25,58	28	53,75
115	2,16	71	26,15	27	54,42

Temperatura [°C]	Tiempo [Min]	Temperatura [°C]	Tiempo [Min]	Temperatura [°C]	Tiempo [Min]
114	2,6	70	26,55	26	55
113	3,03	69	27,35	25	55,67
112	3,33	68	28,2	24	56,33
111	3,75	67	29	23	57
110	4,33	66	29,4	22	57,58
109	4,75	65	30,25	21	58,3
108	5,08	64	31,05	20	58,91
107	5,5	63	31,45	19	59,67
106	6	62	32,25	18	60,33
105	6,5	61	33,05	17	61
104	7	60	33,45	16	61,67
103	7,83	59	34,25	15	62,33
102	7,92	58	35	14	63
101	8,42	57	35,4	13	63,75
100	8,91	56	36,2	12	64,3
99	9,42	55	37	11	65,17
98	9,92	54	37,4	10	65,92
97	10,5	53	38,15	9	66,58
96	11	52	38,4	8	67,38
95	11,5	51	39,3	7	68,08
94	12,08	50	40,05	6	68,75
93	12,67	49	40,4	5	69,58
92	13,25	48	41,15	4	70,42
91	13,83	47	41,55	3	71,25
90	14,41	46	42,35	2	72
89	14,91	45	43,15	1	73
88	15,42	44	43,5	0	73,92
87	16	43	44,2	-1	74,67
86	16,58	42	45	-2	76
85	17,17	41	45,4	-3	77,25
84	17,83	40	46,15	-4	78,42
83	18,33	39	46,83	-5	79,83
82	19	38	47,55	-6	81,25
81	19,58	37	48,08	-7	82,92
80	20,17	36	48,8	-8	84,67
79	20,92	35	49,41	-9	86,42
78	21,67	34	50,41	-10	88
77	22,25	33	50,68		

El sistema de refrigeración como la tabla 4.4 y la figura 4.4 lo muestran es constante en el tiempo, es decir la velocidad de enfriamiento, es igual para cualquier temperatura comprendida entre el rango de -10°C y 120°C .

Estas pruebas han sido realizadas para asegurar el trabajo de la planta para todo rango de temperatura, es decir que para cualquier temperatura en la planta, dicha temperatura puede ser elevada o reducida a una velocidad constante y sin fallas.

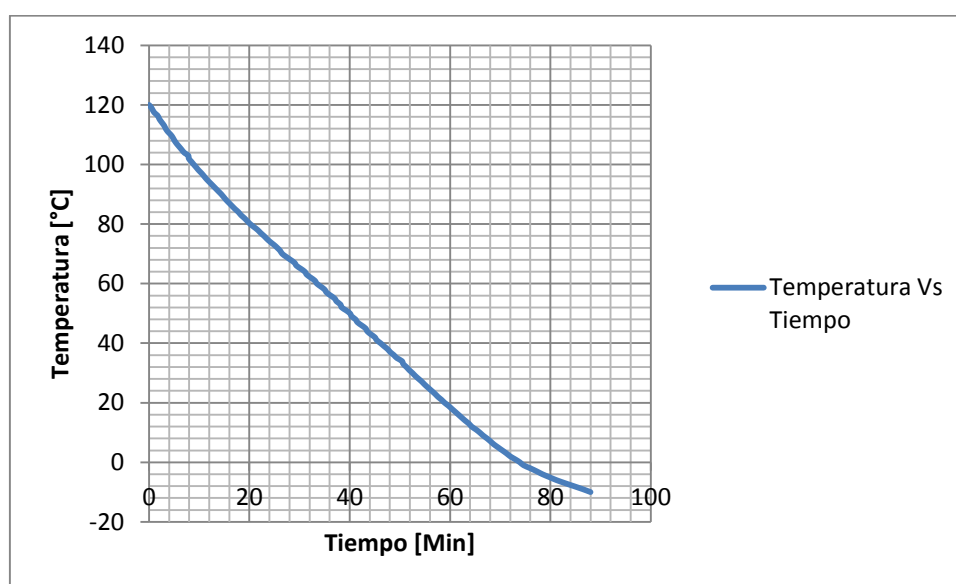


Figura 4.4. Enfriamiento de la planta con Sistema de Refrigeración.

Se debe conocer que si bien el sistema calentador puede ser encendido y apagado a cualquier periodo de tiempo, se debe tener, más cuidado con el sistema de refrigeración, ya que el compresor no puede ser encendido y apagado en un periodo corto y muy repetitivo ya que puede presentarse averías a futuro. El software que controla toda la planta, tiene protecciones de tiempo para que el compresor no se encuentre encendiéndose y apagándose a cualquier momento.

4.2. PRUEBAS DE LECTURA DEL SENSOR DE TEMPERATURA.

Puesto que el transmisor de temperatura MAX31855 es un elemento, que no se comercializa comúnmente, fue importado, en el momento que el sensor llegó al país

se comenzó la conexión y pruebas para el funcionamiento. El programa de lectura del sensor, fue tomado de una de las librerías de comunicación de los programadores arduino, cuyo diagrama de flujo está representado en la figura 4.5.

Inicialmente se creó un programa simple el cual tomaba el dato inmediato del sensor en cada momento, este programa sería la base para el proyecto total.

Como ya se ha explicado anteriormente el dato enviado por el MAX31855, a través de comunicación SPI, es un dato de 32Bits, en estos 32 bits, se encuentra el dato de la temperatura del termopar, la temperatura de la junta del sensor, y bits indicadores de error de lectura o de fallas en la conexión.

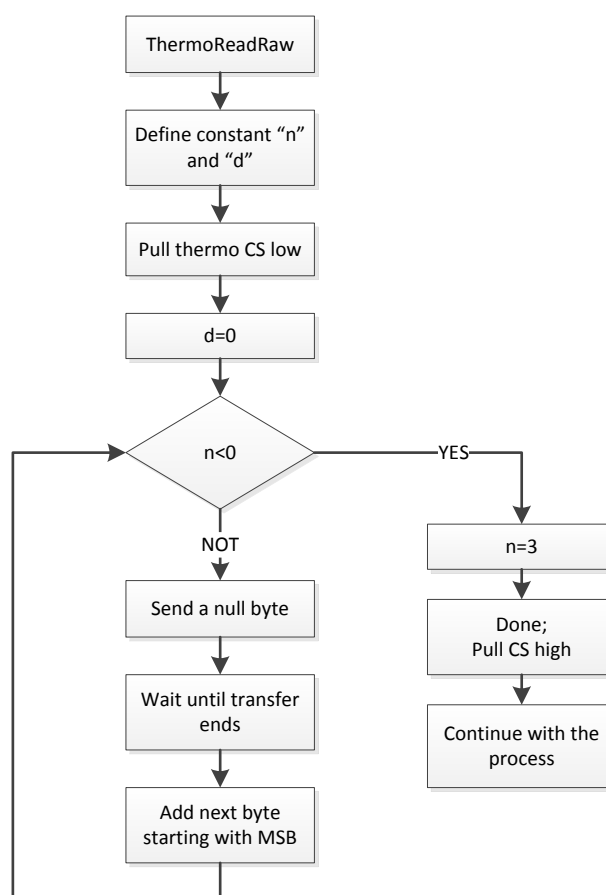


Figura 4.5. Diagrama de flujo de programación de arduino para lectura del MAX31855.

Al probar el programa se notó que el valor obtenido no era ni cercano al valor de temperatura que se tenía en el termómetro digital usado como referencia.

Al continuar realizando pruebas se notó que si bien los datos no eran adecuados, eran proporcionales a la temperatura medida, es decir que por ejemplo cuando la temperatura real era de 20°C, el resultado visto por el programa era de 10.25°C, cuando la temperatura subía a 30°C, el programa presentaba un valor de 15,15°C, y se disminuía a 10°C, el programa leía y presentaba, 5.15°C. A pesar de no ser un valor correcto, era proporcional.

Luego de verificar el programa se notó que al tomar el valor de la temperatura del sensor, como dicho dato es binario, el dato leído, estaba desplazado, un bit. Es decir para un valor de 20 °C, que en binario se lee 0b00010100, al desplazar mal en el programa se leía, 0b00001010, con lo cual como dato binario se tenía 10°C, corregido este error, el resultado fue un valor más cercano al valor real, sin embargo, el valor que se obtenía del sensor al programa era muy variante, esta variación a su vez fue corregida mejorando la estabilidad en la lectura.

4.3. PRUEBAS DE ESTABILIDAD EN LA LECTURA DEL SENSOR.

Como se mencionó anteriormente, si bien la temperatura medida era más cercana a la temperatura real, la variación era muy alta como se ve en la Tabla 4.5.

Estos datos fueron obtenidos en menos de 5 segundos, por tanto la variación presentada impediría que la planta pueda ser controlada por el transmisor MAX31855. Además dicho transmisor, presenta para una medida, únicamente cuatro valores decimales, 0, 25, 50, 75, es decir nunca se tendría variaciones de 0,1°C, para este valor se tendría o 0.0°C, o 0.25°C.

La primera prueba para obtener una estabilidad en el sistema fue, tomar una muestra de 10 valores de datos, y obtener la media aritmética.

Tabla 4.5. Contrastación de valores entre referencia y sensor del proyecto.

Temperatura de Referencia (°C)	Temperatura del programa (°C)
20	15.75
20	14.25
20	15
20	16
20	13.75
20	15.25
20	15.5
20	14.75
20	16

Se dice que la media aritmética o más comúnmente conocida como promedio, es la suma de un determinado número de muestras dividido para, dicho número. Es decir si se tiene una cantidad determinada de muestras $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$, donde “a” es el valor de una muestra determinada y “n” es el número de muestras, la media aritmética o promedio será la de la Ecuación 4.1.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (4.1)$$

El procedimiento dentro del programa para realizar este promedio no es complicado, y fue explicado en el capítulo de software, del proyecto. Después de encontrar el promedio de 10 valores, se pudo notar una mejora en la obtención de datos sin embargo, se seguía teniendo una variación de valores que aún podrían afectar al control de la planta.

Se optó por tomar como muestra 20 valores, y la variación no empeoro ni mejoró. Entonces se aplicó una obtención de un valor más probable, por el método estadístico de la media cuadrática.

La media cuadrática es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de un número determinado de muestras dividido para dicho número. Por tanto si se tiene una cantidad determinada de muestras $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$, donde “ a ” es el valor de una determinada muestra y “ n ” es el número de muestras, la media cuadrática será la presentada en la Ecuación 4.2.

$$\bar{X} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (4.2)$$

Al realizar este cálculo con 13 muestras, el valor de la temperatura se estabilizó, de una manera adecuada, con un alto grado de aceptación, éste resultado se debe, a que al utilizar una media cuadrática, se elimina la influencia del signo en el error de la medida.

Durante las pruebas que se realizaron después del arreglo de la lectura de la temperatura, se pudo notar que en ciertos momentos, totalmente aleatorios, se tenía una variación de la temperatura mostrada en el programa, durante un tiempo determinado entre 30 y 70 segundos, es decir si por ejemplo se tenía una lectura de temperatura de 35°C, inesperadamente, la temperatura disminuía a 31°C, y después de un tiempo, comprendido en el intervalo antes explicado, la lectura volvía a ser la anterior, como la temperatura del sensor en ese momento era, aunque por error, menor a la temperatura de Setpoint, el sistema comenzaba a elevar la temperatura del etilenglicol, y en el momento que se regulaba este fenómeno la temperatura había subido, y aparentemente el control no había realizado la acción pertinente para apagar el sistema calentador.

Para regular este error se realizó un sistema de seguridad de falla de lectura, el cual cuando la lectura se altera inmediatamente en un valor de $\pm 0.35^\circ\text{C}$, se comienza a realizar un proceso de alerta en el sistema, en el momento que este efecto ocurre, se

enciende un led de nombre REGULACIÓN indicando, que la temperatura que se lee en ese momento no es la verdadera, en ese momento, el programa no toma nuevas lecturas sino que muestra la última medida, obtenida, que será la del error o salto, esta acción dura 5 segundos aproximadamente, en ese momento, el sistema calentador no funcionara, impidiendo de esta manera que la planta aumente su temperatura de una manera indeseada, después de este momento se comienza a realizar la toma de datos por la media cuadrática normalmente.

Por pruebas realizadas se pudo notar que cuando se detenía esta toma de datos, con el momento especificado anteriormente, el sistema reducía la posibilidad de obtener errores en el control de temperatura.

Cuando ya se había solucionado el problema del salto surgió otro problema, cuando se encendía la planta, el valor que aparecía en primer lugar no presentaba la temperatura que se tenía en ese momento, sino que al encenderse por primera vez el sistema, la temperatura sube o baja paulatinamente desde cero dependiendo del caso, hasta llegar a la temperatura que se tiene realmente. Luego de poner la barrera para impedir los saltos, dicha barrera en el programa entendía estos saltos de inicio de lectura, como saltos de error de temperatura, y cuando se encendía por primera vez la planta, el valor que se leía era permanentemente en cero y se encendía la luz de señal de presencia de salto o error en la medida de la temperatura.

Para eliminar este problema se creó una rutina en el programa de inicio de la lectura, dicha rutina fue explicada en el capítulo de software del sistema, pero se ha vuelto a retomar esta acción, en el capítulo de pruebas y resultados, para justificar el por qué se incluyen estas acciones en el programa en primer lugar.

4.4. PRUEBAS DE TIEMPO DE RESPUESTA A LA VARIACION DE TEMPERATURA DEL TERMOPAR.

Al tener un sistema adecuado de lectura y estabilidad de la temperatura por parte del programa, se comienza a realizar una tabla con valores de temperatura del sensor de la planta del proyecto y del sensor del termómetro digital usado como referencia, estos valores eran tomados al mismo tiempo a distintas temperaturas de la planta, se comienza calentando el etilenglicol, en el envase especificado en el proyecto desde una temperatura ambiente hasta 80°C, y la primera tabla que se obtuvo de este trabajo fue la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Tabla comparativa 1, entre sensor del proyecto y patrón de medida.

SENSOR		SENSOR		SENSOR	
PATRÓN	PLANTA	PATRÓN	PLANTA	PATRÓN	PLANTA
0	5,99	16,5	19	43,5	41,66
0,1	5,9	17	19,45	44	42
0,2	5,92	17,5	19,66	44,5	42,35
0,3	5,9	18	20,4	45	42,85
0,4	5,99	18,5	20,65	45,5	43,23
0,5	5,98	19	21,2	46	43,71
0,6	6	19,5	21,59	46,5	44,22
0,7	6,5	20	21,86	47	44,3
0,8	6,5	20,5	22,3	47,5	44,85
0,9	6,52	21	22,73	48	45,33
1	6,55	21,5	23,04	48,5	45,9
1,1	6,62	22	23,56	49	46,37
1,2	6,76	22,5	23,9	49,5	46,37
1,3	6,78	23	24,35	50	46,95
1,4	6,81	23,5	24,85	51	47,95
1,5	7,03	24	25,1	52	48,4
1,6	7,04	24,5	25,56	53	49,52
1,7	7,1	25	25,92	54	50,4
1,8	7,15	25,5	26,47	55	51,24
2	7,46	26	26,93	56	51,98
2,2	7,57	26,5	27,48	57	52,9
2,4	7,78	27	27,76	58	53,65
2,6	7,91	27,5	28,19	59	54,64
3	8,3	28,5	29,07	61	56,1
3,2	8,4	29	29,53	62	57,3
3,4	8,55	29,5	30	63	58,15
3,6	8,67	30	30,2	64	58,9
3,8	8,88	30,5	30,46	65	59,97

SENSOR		SENSOR		SENSOR	
PATRÓN	PLANTA	PATRÓN	PLANTA	PATRÓN	PLANTA
4,5	9,39	31,5	31,45	67	61,8
5	9,63	32	31,66	68	62,5
6	10,72	33	32,65	70	64,24
6,5	10,75	33,5	33	71	65,18
7	11,12	34	33,45	72	66
7,5	11,86	34,5	33,67	73	66,8
8	12,27	35	34,31	74	67,85
8,5	12,53	35,5	34,6	75	68,85
9	13,13	36	35,2	76	69,5
9,5	13,42	36,5	35,39	77	70,3
10	13,86	37	36	78	71,33
10,5	14,15	37,5	36,49	79	72,3
11	14,63	38	36,94	80	73,2
11,5	15	38,5	37,2	81	73,67
12	15,63	39	37,72	82	75,2
12,5	15,73	39,5	38,23	83	76,1
13	16,26	40	38,5	84	76,9
13,5	16,68	40,5	39,03	85	77,68
14	17	41	39,12	86	78,75
14,5	17,53	41,5	39,61	87	79,65
15	17,99	42	40,3	88	80,7
15,5	18,35	42,5	40,83		
16	18,84	43	41,2		

Gracias a esta contrastación de valores, se busca encontrar el error, de medida entre el sensor de la planta, y el patrón, para ello a partir de los datos se crea un gráfico del error existente, haciendo una resta entre la medida del sensor patrón y la medida del sensor de la planta.

Por tanto en el eje x se encontraría los valores de temperatura medidos por el sensor de la planta, y en el eje y, el error correspondiente a cada medida del sensor de la planta, y el resultado presentado en la Figura 4.6.

Como se puede ver en la Figura 4.6 el error tiende a formar, una ecuación de segundo grado, si dicha ecuación es restada al valor de temperatura medida por el sensor de la planta en todo momento, se puede corregir el error existente.

Se ingresa esta ecuación en el programa y se vuelve a tomar datos, obteniéndose así la Tabla 4.7.

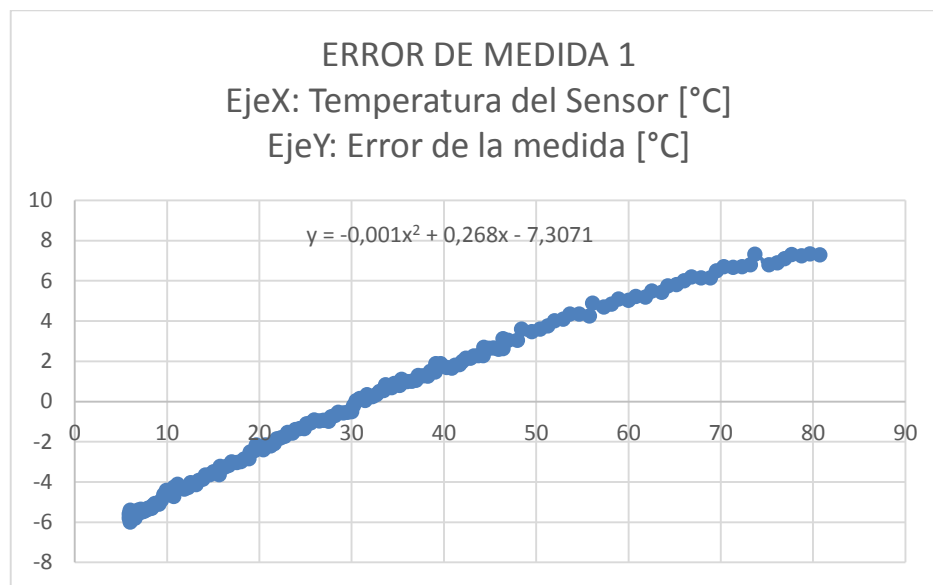


Figura 4.6. Grafica del error 1 en la medida del sensor de la planta con respecto al patrón de medida.

Igual que en el proceso anterior, se encontró el error existente el cual debería ser casi nulo, pero como se ve en la Figura 4.7. Se tiene un error muy inestable, hubiera sido razonable tener un error creciente o decreciente, para corregirlo nuevamente, pero después de calcular otras tablas, el error siempre variaba.

Finalmente y luego de realizar pruebas a la misma temperatura se descubre que se están tomando los datos para la tabla muy rápido, y que no se ha tomado en cuenta la respuesta al cambio de temperatura por parte del termopar, del sensor patrón como del sensor de la planta.

Tabla 4.7. Tabla comparativa 2, entre sensor del proyecto y patrón de medida.

°C			°C		
Patrón	Sensor	Resta	Patrón	Sensor	Resta
10	8,34	1,66	40,5	39,3	1,2
10,5	9,1	1,4	41	39,7	1,3
11	9,72	1,28	41,5	39,9	1,6

11,5	9,59	1,91	42	40,65	1,35
12	9,91	2,09	42,5	41,15	1,35
12,5	10,95	1,55	43	41,9	1,1
13	11	2	43,5	42,2	1,3
13,5	11,92	1,58	44	42,3	1,7
14	12,53	1,47	44,5	43,32	1,18
14,5	12,72	1,78	45	43,77	1,23
15	13,24	1,76	45,5	44,35	1,15
15,5	12,45	3,05	46	44,31	1,69
16	14,25	1,75	46,5	45,5	1
16,5	15,1	1,4	47	45,61	1,39
17	15,21	1,79	47,5	45,97	1,53
17,5	15,7	1,8	48	47,02	0,98
18	16,68	1,32	48,5	47,4	1,1
18,5	16,87	1,63	49	48,11	0,89
19	17,23	1,77	49,5	48,11	1,39
19,5	17,3	2,2	50	48,92	1,08
20	18,76	1,24	51	50	1
20,5	19,07	1,43	52	51,2	0,8
21	19,73	1,27	53	51,92	1,08
21,5	20,23	1,27	54	53,2	0,8
22	20,67	1,33	55	54,1	0,9
22,5	21,1	1,4	56	55,03	0,97
23	21,43	1,57	57	56	1
23,5	22,17	1,33	58	57,28	0,72
24	22,7	1,3	59	58,23	0,77
24,5	23,19	1,31	60	59	1
25	23,86	1,14	61	60,1	0,9
25,5	24,1	1,4	62	61,21	0,79
26	24,5	1,5	63	58,8	4,2
26,5	25,2	1,3	64	63	1
27	25,71	1,29	65	64	1
27,5	26,2	1,3	66	65	1
28	26,77	1,23	67	63,5	3,5
28,5	27,26	1,24	68	66	2
29	25,26	3,74	69	64,7	4,3
30	28,8	1,2	71	67,6	3,4
30,5	29,2	1,3	72	71	1
31	29,71	1,29	73	72,1	0,9
31,5	30,1	1,4	74	71	3
32	30,71	1,29	75	70,53	4,47
32,5	31	1,5	76	75,12	0,88

°C			°C		
Patrón	Sensor	Resta	Patrón	Sensor	Resta
33,5	32	1,5	78	77,13	0,87
34	32,77	1,23	79	78,22	0,78
34,5	33,1	1,4	80	79,1	0,9
35	33,33	1,67	81	80,5	0,5
35,5	34,22	1,28	82	81,25	0,75
36	34,22	1,78	83	82,7	0,3
37	34,85	2,15	84	83	1
37,5	36,36	1,14	85	83,2	1,8
38	36,5	1,5	86	85	1
38,5	37,22	1,28	87	86,45	0,55
39	37,71	1,29	88	87,4	0,6
39,5	38,13	1,37	89	88,81	0,19
40	38,93	1,07	90	89,5	0,5
40,5	39,3	1,2			

Al investigar acerca del tema se determina que la vaina protectora de la termocupla, alarga el tiempo de respuesta al cambio de temperatura por parte de la termocupla. La termocupla que inicialmente se había escogido para el proyecto era una termocupla tipo K de la marca OMEGA, con una vaina protectora de 8mm de diámetro. Al poner dicha termocupla, en un ambiente con una temperatura alta, y luego colocarla en otro ambiente a temperatura baja y viceversa se notaba que el tiempo de respuesta superaba los 10 segundos y que en ciertos casos incluso la termocupla no llegó a medir el valor adecuado porque se quedaba con cierto grado de calor almacenado en la vaina protectora.

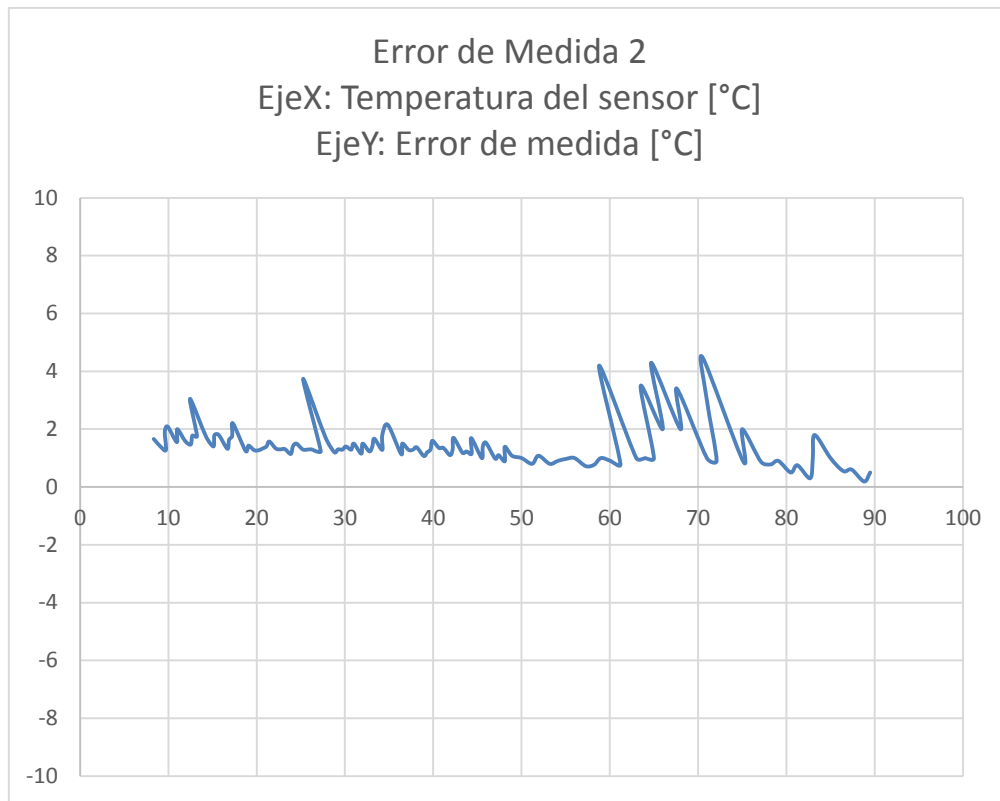


Figura 4.7. Grafica del error 2 en la medida del sensor de la planta con respecto al patrón de medida.

Al ver este fenómeno se decide cambiar de termocupla a una de las mismas características de la primera pero sin vaina de protección. La termocupla de la marca JUMO, tiene la tabla 4.8. Como tabla de respuesta a variaciones de temperatura.

Luego de realizar este cambio se vuelve a tomar datos y se obtiene mayor estabilidad en la medida y mayor rapidez de respuesta al cambio de temperatura por parte del sensor. Por tanto si un termopar es usado para medir temperatura, y se necesita una respuesta rápida a determinadas variaciones de temperatura, no se debe colocar una vaina protectora en el sensor.

Tabla 4.8. Tiempo de respuesta al cambio de temperatura del Termopar.

Diferencia de Temperatura	Tiempo de Respuesta
De 100°C a 0°C	3.5seg
De 40°C a 0°C	1.8seg
De 30°C a 20°C	0.5seg

4.5. PRUEBAS PARA CÁLCULO DE LA PENDIENTE DE CORRECCIÓN EN LA MEDIDA.

Luego de cambiar el termopar, se obtuvieron nuevos datos para obtener una ecuación la cual corrija por medio de programación la diferencia de medida entre la temperatura medida por el sensor de la planta y el patrón de medida utilizado.

Como el transmisor de temperatura MAX31855, realiza una obtención de medida distinta cuando mide temperaturas sobre 0°C, que cuando mide temperatura bajo 0°C, se realizaron dos pruebas separadas.

La primera prueba consistía en obtener, cuatro medidas comparativas entre el sensor de la planta y el sensor de medida utilizado como patrón. Se comenzó colocando en el programa de la planta un setpoint de 50°C, en ese momento el sistema calentaba el líquido en el envase de la planta hasta que el sensor de la planta llegue al valor antes mencionado, llegado a este punto, se colocaba el sensor de temperatura patrón, en el líquido, si el sensor de la planta hubiera estado ya calibrado diera como valor de temperatura la misma que mostraba el sensor patrón, pero como aún no se tenía esta regulación, había un error de medida, a pesar que el sensor de la planta en este caso diera 50°C todo el tiempo, el sensor patrón de medida, tendría un valor distinto, dicho valor fue copiado en tablas por cuatro ocasiones, con un lapso de separación de cada toma de medida de 10 minutos, es decir que luego de 50 minutos, de mantener la temperatura a 50°C, según el sensor de la planta se habrían tomado 4 medidas del sensor patrón de temperatura.

Para asegurarse de que las medidas fueron tomadas adecuadamente y que fue tomado en cuenta cualquier tipo de parámetro de variación, se varió la temperatura de la planta desde 50°C hasta llegar a 100°C, deteniendo el control para la toma de medidas del sensor patrón de medida cada que se aumentaba 10°C, y luego que se llegase a 100°C se dejó que la temperatura vaya bajando paulatinamente desde el valor antes mencionado hasta que la planta tenga un valor de 20°C tomando valores de comparación cada 10°C, y desde este último punto la temperatura de la planta fue elevada hasta 40°C, tomando igualmente datos comparativos cada 10°C, este proceso fue realizado en un total de dos días, y los resultados obtenidos fueron los siguientes.

Tabla 4.9. Tabla comparativa 3, entre sensor del proyecto y patrón de medida.

TOMA DE VALORES EN °C					
Sensor	Patrón1	Patrón2	Patrón3	Patrón4	Promedio
50	46,5	47	46,8	47,3	46,9
60	57,5	57,5	57,7	57,9	57,65
70	68,5	68,8	68,8	68,2	68,575
80	79	77,6	78	77,5	78,025
90	87,9	87,9	87,8	88	87,9
100	97,7	98,1	98,1	98,1	98
90	88	88,7	88	87,8	88,125
80	78,3	77,7	78,5	77,6	78,025
70	67,5	67	67,3	67,7	67,375
60	56,8	56,5	56,5	56,4	56,55
50	45,5	45,5	45,7	45,7	45,6
40	34,8	35	35,3	35,1	35,05
30	24,4	24,7	25	25,2	24,825
20	14	13,8	13,6	13,6	13,75
10	2,8	2,8	3	2,8	2,85
10	3,1	3,2	2,8	3	3,025
20	13,7	13,3	13,3	14,1	13,6
30	24,6	25,1	25,2	25,3	25,05
40	35,7	36,1	35,8	36,2	35,95

La Tabla 4.9 muestra el valor de la temperatura de la planta según el sensor instalado en la misma, las cuatro tomas de medida del sensor patrón de medida cada 10 minutos, y el promedio de estas cuatro tomas.

Hasta este punto había dos promedios de toma de medida por parte del sensor patrón de medida para cada temperatura, probada, así que se volvió a hacer otro promedio con estos resultados.

Tabla 4.10. Tabla comparativa 4, entre sensor del proyecto y patrón de medida con diferencia entre el uno y el otro.

VALORES EN °C		
Sensor De la planta	Sensor Patrón	Diferencia Sensor de la planta – Sensor Patrón
10	2,9	7,06
20	13,7	6,33
30	24,9	5,06
40	35,5	4,50
50	46,3	3,75
60	57,1	2,90
70	68,0	2,03
80	78,0	1,97
90	88,01	1,99
100	98	2,00

A partir de estos valores se obtuvo la gráfica del error de medida para cada valor de temperatura de la planta para valores superiores a 0°C.

Con la ayuda de la gráfica se pudo obtener la ecuación que ayudaría, a eliminar el error correspondiente a cada, valor de temperatura medido por el sensor de la planta. Luego de colocar la ecuación en el programa se vuelve a tomar datos del sensor de la planta y del sensor patrón desde una temperatura de 10°C, hasta 120°C, que es el valor máximo de temperatura que se desea controlar en la planta.

Al ver los resultados obtenidos en la Figura 4.8. y en la Tabla 4.11 se ve que el error entre una medida y la otra no supera los $\pm 0.3^\circ\text{C}$, lo que quiere decir que el valor que a partir de esta corrección, se mida en el sensor de temperatura de la planta para valores superiores a los 0°C, es muy cercano al valor real de temperatura.

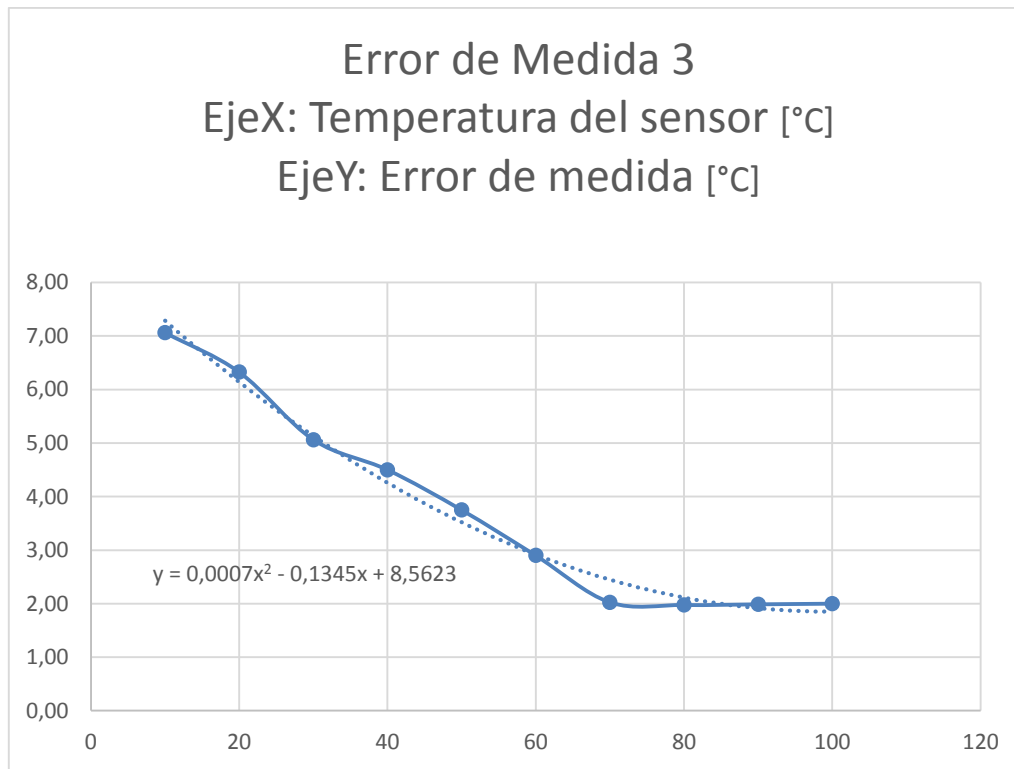


Figura 4.8. Grafica del error 3 en la medida del sensor de la planta con respecto al patrón de medida.

Tabla 4.11. Tabla comparativa 5, entre sensor del proyecto y patrón de medida con error obtenido.

TOMA DE VALORES EN °C						
Sensor	Patrón1	Patrón2	Patrón3	Patrón4	Promedio	Error
10	10,2	10,4	9,9	10	10,1	0,1
20	20,2	20,1	19,6	19,6	19,9	-0,1
30	30,4	30,4	29,6	29,6	30	0,0
40	40,5	40,6	39,4	39,6	40,0	0,0
50	49,5	49,7	49,7	49,8	49,7	-0,3
60	60	59,7	60	59,9	59,9	-0,1
70	70,4	70,2	70,1	70	70,2	0,2
80	80,2	80,2	80,3	80,5	80,3	0,3
90	89,8	89,7	90,8	90,6	90,2	0,2
100	99,8	99,7	99,9	100,4	100,0	-0,1
110	109,9	109,9	109,9	110,3	110	0,0
120	119,7	120	119,4	120	119,8	-0,2

Como se mencionó antes la medición de temperatura para valores menores a 0°C, no se maneja con la misma subrutina, que de la medición de valores mayores a 0°C, por tanto a pesar de haber corregido los valores superiores, se debía hacer el mismo procedimiento, para encontrar la ecuación de corrección para valores inferiores.

Tabla 4.12. Tabla comparativa 6, entre sensor del proyecto y patrón de medida con error obtenido.

TOMA DE VALORES EN °C						
Sensor	Patrón1	Patrón2	Patrón3	Patrón4	Promedio	Error
-16	-9,2	-9	-9,9	-9,3	-9,35	6,65
-14	-7,4	-6,9	-6,8	-6,8	-6,975	7,025
-12	-5,2	-5,4	-4,9	-4,8	-5,075	6,925
-10	-3,2	-3,8	-2,8	-3	-3,2	6,8
-8	-0,7	-1,1	-0,8	-0,3	-0,725	7,275

A partir de las pruebas de corrección de temperatura para valores superiores a los 0°C, se enfría la planta hasta -10°C, medidos por el patrón y se va elevando la temperatura y cada 2°C, se realizaba la toma de datos. Los resultados obtenidos, muestran que el error en este rango de medidas es levemente creciente y se asemeja más a una constante que a una pendiente, por tanto se promedian los errores obtenidos para así encontrar una constante, como valor único de corrección de error, este valor es 6.93°C, es decir que el sensor de la planta, medía la temperatura 6.93°C, menos que el valor real, que tenía la planta, es un error alto, pero constante.

Luego de incluir este error en el programa se volvió a hacer pruebas obteniendo el resultado de la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Tabla comparativa 7, entre sensor del proyecto y patrón de medida con error obtenido.

TOMA DE VALORES EN °C						
Sensor	Patrón1	Patrón2	Patrón3	Patrón4	Promedio	Error
-2	-1,8	-1,5	-1,3	-1,7	-1,575	0,425
-6	-5,9	-6,4	-5,9	-5,8	-6	0
-10	-9,7	-10,2	-10,2	-9,8	-9,975	0,025

Se realizaron únicamente tres medidas las cuales fueron suficientes para encontrar el error, en promedio el error encontrado luego de realizar la compensación en el programa, fue de 0.15°C . Un valor adecuado que cumple con los alcances planteados en el presente proyecto.

4.6. CONTROL DE ESTABILIDAD EN LA TEMPERATURA DE LA JUNTURA.

Si bien el transmisor de temperatura MAX31855, presenta una compensación interna de la junta fría, el catálogo también muestra que, existe una posibilidad de alteración de la medida al tenerse un cambio en la temperatura de la unión del termopar, que viene a representar la temperatura del sensor.

En la Figura 4.9, se muestra que si se logra tener la temperatura del sensor, a una temperatura comprendida entre aproximadamente 20 y 30°C , el error de la medida va a ser constante equivalente a $-0,15^{\circ}\text{C}$, es decir que si se disminuye o se supera este rango el error aumentara constantemente, incluso hasta el valor de 1°C .

Al realizar el encendido de la planta, ya con todos los elementos instalados, y colocar en el setpoint, un valor de 80°C . Se comenzó a tomar datos del valor de la temperatura interna, del sensor cada 10 minutos durante 70 minutos, y estos resultados son presentados en la Tabla 4.9.

Si bien la temperatura del sensor no se eleva a cantidades que pudieran dañar al elemento, se puede observar, que no es constante, por tanto si a la planta se la pusiera en funcionamiento por un tiempo, mayor, el error sin duda comenzaría a aumentar, es por eso que se tomó la decisión, de colocar un ventilador, que permita el ingreso de aire desde el medio exterior hasta la caja de control, esto ayudaría a que el aire con menos calor circule, dentro de la caja, por tanto, se estabilice la temperatura a la que se encuentra el sensor. Se recuerda que el sensor está instalado en la placa de control, la cual esta empotrada en una de las caras de la caja de control.

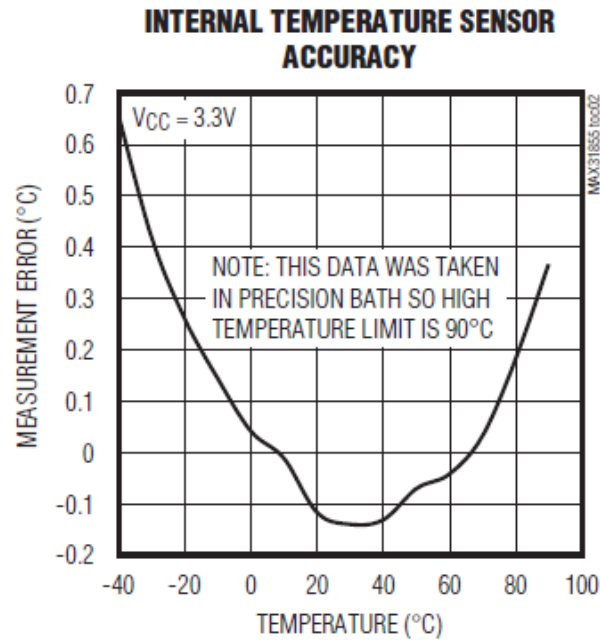


Figura 4.9. Gráfica del error de medida en función de la temperatura interna del sensor [10]

Al instalar el ventilador, se tomaron notas del valor de temperatura de la junta del sensor, cada 10 minutos durante 70 minutos como la vez anterior, igualmente se colocó el setpoint en 80°C.

Tabla 4.14. Tabla comparativa 1, Temperatura de la junta fría Vs Tiempo.

Tiempo min	Temp °C
0	22,62
10	24,69
20	25,68
30	26,68
40	27,62
50	28,68
60	29,63
70	30,68

En la Tabla 4.15 se observa que a los 70 minutos, el valor de la temperatura de la junta fría del sensor es decir la temperatura promedio que se encuentra en la caja de control, es de 27.81°C, que es menor a los 30.68°C que se tenían en la caja en el tiempo transcurrido sin instalar el ventilador.

El rango de variación de temperatura ha disminuido, lo cual es bueno, pero aún existe la posibilidad que en el transcurso del tiempo se siga teniendo una elevación de la temperatura dentro de la caja de control.

Tabla 4.15. Tabla comparativa 2, Temperatura de la junta fría Vs Tiempo.

Tiempo min	Temp °C
0	22,62
10	24,37
20	25,37
30	26,12
40	26,81
50	27,31
60	27,62
70	27,81

Por eso como una última solución, se instaló un segundo ventilador en la caja de control, esta vez, en uno de los laterales de la caja, y en el otro extremo se hizo un agujero, para la salida del aire de mayor temperatura, se realizaron tomas de temperatura en el tiempo obteniendo el resultado que se muestra en la Tabla 4.16.

Finalmente con los dos ventiladores instalados, se puede ver en la Tabla 4.16 que la temperatura de la caja sube hasta un valor de 26.56°C, en un transcurso de tiempo de 40 minutos y desde ese instante la temperatura se mantiene, lo cual es el resultado que se buscaba obtener.

Tabla 4.16. Tabla comparativa 3, Temperatura de la junta fría Vs Tiempo.

Tiempo min	Temp °C
0	23,31
10	25
20	25,87
30	26,31
40	26,56
50	26,62
60	26,62
70	26,62

En este punto se realizan pruebas en el límite superior de control de la planta, que es a un punto de temperatura de 120°C. Se puede ver que la planta puede llegar a esta temperatura sin ningún problema y la lectura del sensor de la planta sigue teniendo relación con la temperatura del sensor patrón. Pero se nota que a pesar que el etilenglicol utilizado en la planta no llega al punto de ebullición a temperaturas no tan altas como el agua, comienza a emanar pequeñas cantidades de gases, gases que suben por el orificio que se encuentra en la parte inferior de la caja de control por donde sale el agitador, la resistencia térmica y el termopar, hacia el etilenglicol, hay que tener seguridad ya que este líquido es toxico a temperaturas elevadas, las normas de seguridad serán detalladas en el manual del usuario. Al subir dicho gas por este orificio afecta la temperatura interna de la caja y también genera un cierto grado de humedad, en los elementos que se encuentran instalados. Este fenómeno es muy peligroso partiendo del hecho que puede ocasionar fallos en el sistema, incluso averías permanentes.

Para evitar este daño se instalan dos ventiladores en el soporte metálico de la caja de control, estos ventiladores permiten el escape del gas generado en temperaturas elevadas, hacia el exterior de la planta, impidiendo alguna alteración en la caja de control, manteniéndola a temperatura constante y en perfectas condiciones.



Figura 4.10. Ventiladores instalados para extracción de gas en la planta.

Solucionado el tema de los gases generados a temperaturas elevadas se procede a probar la planta a la temperatura del límite inferior del rango de control, es decir -10°C , se coloca el setpoint a dicha temperatura, automáticamente se enciende el sistema de refrigeración, y la temperatura comienza a descender.

Luego de una hora de encendido el sistema de refrigeración se nota que la temperatura no llega hasta los -10°C , sino que se encuentra en -9.4°C , lo cual no era lo que sucedió en las primeras pruebas de la planta, lo que quería decir, que algún parámetro había cambiado desde las primeras mediciones. Luego de seguir realizando pruebas se nota que si el sistema de ventilación que se colocó al final, para la extracción de gas, se mantenía encendido a bajas temperaturas, permite el ingreso de energía calórica del ambiente; a temperaturas mayores a los 0°C , no afectaba que estén encendidos dichos ventiladores, pero si la temperatura baja, los ventiladores impiden la velocidad de reducción de la temperatura.

Por tanto se vuelve a intentar reducir la temperatura del líquido de la planta a -10°C , sin encender los ventiladores de extracción de gas. El resultado final es que al tener encendidos los ventiladores de la caja de control, y apagados los ventiladores de

extracción de gas, el tiempo que tarda la planta para llegar a los -10°C se reduce al tiempo que se tenía inicialmente que es el tiempo que se presenta en la Tabla 4.4.

4.7. CORRIENTE DE ARRANQUE DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Se dice que para compresores de potencias pequeñas, se utilizan motores de corriente alterna monofásicos, los cuales, son óptimos para el trabajo requerido por ser pequeños, económicos, y pueden funcionar con refrigerante, es decir en compresores herméticos.

El torque de un motor monofásico de corriente alterna es cero, cuando dicho motor está en reposo. Para poder arrancar estos motores se debe comenzar el funcionamiento, como si se tuviera un motor bifásico, este efecto se logra colocando dos bobinados en el motor, uno principal y otro auxiliar que se encontrará en serie a un condensador de arranque, el condensador, logra un desfase entre la corriente del bobinado principal y del auxiliar.

Gracias a este desfase el motor puede comenzar a girar, el bobinado auxiliar continúa conectado después del arranque hasta que la velocidad del motor llegue al 75% de su velocidad nominal, en ese momento el ramal del bobinado auxiliar en serie al condensador de arranque se desconecta con la ayuda de un interruptor centrífugo.

El motor monofásico, funciona como si se encendiera un motor trifásico, y luego de un momento, una de sus fases fuera desconectada, como existe una similitud entre estos dos tipos de motores, entonces se entiende que sus características eléctricas son similares.

En un motor asíncrono trifásico, se conoce que en el momento del arranque se tiene una corriente, que es mayor a la corriente normal de trabajo, que se tiene luego del encendido.

Tabla 4.17. Corriente de arranque en función de la Potencia Nominal del Motor.

POTENCIA NOMINAL DEL MOTOR (Kw)	$I_{ARRANQUE} / I_{PLENA CARGA}$
0.75 < P < 1.5	4.5
1.5 < P < 5	3
5 < P < 15	2
P > 15	1.5

Como se puede observar en la Tabla 4.17, a medida que la potencia nominal es mayor, la corriente de arranque disminuye en proporción a la corriente de funcionamiento a plena carga. En el caso de la planta del proyecto, el motor del compresor tiene una potencia nominal de 1/8 HP, lo que quiere decir que si la tabla es correcta, en el momento del arranque se tendrá una corriente mayor a 5 veces la corriente de funcionamiento.

Esta elevación de corriente en pruebas de funcionamiento del compresor, afectaba al valor del setpoint colocado en la planta, lo que quería decir que al encenderse el motor del compresor, se generaba un error, en el microcontrolador, que si bien no ocasionaba daños a la placa de control, afectaba, a la calidad del trabajo.

Para eliminar este problema, se planteó la idea de aislar la alimentación del compresor, de la alimentación del resto del sistema, puesto que al realizar pruebas externas, se veía que si se conectaba la alimentación del compresor a otra fase, la planta y el respectivo programa funcionaban perfectamente.

La manera más sencilla acorde al presupuesto general de la planta, fue, instalar un regulador de voltaje. El regulador de voltaje posee dos filas de tomacorrientes, la primera fila alimenta al elemento conectado a manera de baypass, directamente desde la línea de alimentación, es decir funciona simplemente como una extensión, la segunda fila, está aislada de la primera fila antes mencionada, y es la que tiene una

circuitería interna, que ayuda a regular la alimentación, al elemento conectado, en caso de sobrevoltajes, o picos de corriente.

La alimentación general de la planta fue conectada, a la parte de bypass, y la alimentación del sistema de refrigeración, fue conectada a uno de los tomacorrientes que tiene regulador de voltajes, y protección de sobrecorrientes.

4.8. PRUEBA DE PRECISION DE LA TEMPERATURA EN LA PLANTA.

La precisión en un aparato indica de una manera global el error existente para cada medida que se tome, con respecto a la sensibilidad, fidelidad del aparato y otros parámetros que se explicarán a continuación.

Existen otros errores que pueden afectar a la medida, pero que pueden ser corregidos, como ya se ha hecho anteriormente a través de pruebas, y calibraciones por corrección de pendientes o constantes dentro del programa.

Si se tiene un instrumento que es muy preciso en la medida que brinda y además está bien calibrado, entonces se dice que se tiene un instrumento exacto.

El error más fácil de corregir es el error de cero, es un error constante en todas las medidas que se tomen, como en los valores medidos por el sensor, en temperaturas bajo cero, donde no fue necesario, colocar una pendiente de compensación del error en el programa, sino que simplemente se sumó un valor constante.

Para calcular el error se debe tomar en cuenta el tipo de medida que se va a analizar. Existen dos tipos de medidas, las directas y las indirectas. Como la medida que se tiene en la planta es una medida directa, el estudio se centrará, en encontrar el error en este tipo de medida.

Los errores según su comportamiento dentro de las medidas directas se clasifican en dos, los errores sistemáticos y los errores accidentales.

Los errores sistemáticos son aquellos que se presentan constantemente, es decir que influyen siempre de la misma manera en la medida, como el error de cero que fue explicado anteriormente, o la pendiente de compensación que fue puesta en el programa para calibrar los valores de temperatura mayores que cero.

Los errores accidentales son aquellos que ocurren de manera aleatoria o imprevisible, es cuando se toman dos medidas de un mismo valor, y las dos medidas difieren, en número, pueden deberse a ligeros cambios en la medida, un sensor poco fiable, o inhabilidad del lector.

Para encontrar la precisión de la planta, se ha colocado el setpoint de la misma en un valor A, fijo, y se han tomado cada 10 minutos datos del termómetro patrón de medida. Este proceso fue repetido por 13 ocasiones, con 13 valores distintos tomados al azar sin ningún orden específico, para tomar en cuenta cualquier alteración posible, de tiempo y ambiente. De todos los valores de la tabla se va a hacer el cálculo respectivo del error, pero para explicar el procedimiento de obtención de dicho error se ha tomado en cuenta como ejemplo el conjunto de datos obtenido para un valor de temperatura de 53°C, obtenidos por el patrón de medida.

Tabla 4.18. Pruebas de contrastación entre valor de temperatura del sensor de la planta y el sensor patrón de medida.

Valores expresados en °C				
Patrón	Medida1	Medida2	Medida3	Medida4
104	103,3	103,4	103,2	103,3
67	66,4	66,7	66,7	66,8
81	80,7	80,8	80,7	81
7	7,2	7,2	7,2	7
-5	-4,9	-4,9	-5,1	-5,1
-1	-0,6	-0,7	-0,8	-1
11	11,1	10,8	11,1	11

Valores expresados en °C				
Patrón	Medida1	Medida2	Medida3	Medida4
99	98,6	98,7	98,8	98,4
53	53,3	52,9	53	52,8
-5	-4,8	-4,4	-4,5	-4,9
35	35,2	35,2	35	35
70	69,5	69,6	69,7	70

Se obtendrá el valor medio de los datos de temperatura correspondiente al sensor de la planta, en base a la ecuación:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (4.3)$$

Reemplazando los datos obtenidos para una temperatura de patrón de medida de 53°C, en la ecuación se tiene:

$$\bar{X} = \frac{53,3+52,9+53+52,8}{4} \quad (4.4)$$

$$\bar{X} = 53$$

Luego de obtener el valor medio, se procede a encontrar la desviación típica σ_{n-1} :

$$\sigma_{n-1} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (4.5)$$

$$\sigma_{n-1} = \left[\frac{(53 - 53,3)^2 + (53 - 52,9)^2 + (53 - 53)^2 + (53 - 52,8)^2}{4 - 1} \right]^{1/2}$$

$$\sigma_{n-1} = \left[\frac{0,09 + 0,01 + 0 + 0,04}{3} \right]^{1/2}$$

$$\sigma_{n-1} = 0,216$$

El valor \bar{X} es el valor más probable de la magnitud medida, por tanto este valor es la mejor estimación del valor real.

La desviación típica es usada para determinar si un valor puede ser rechazado de la muestra. El criterio común dice que si un X_i difiere de \bar{X} en un valor menor a $2\sigma_{n-1}$, es una medida correcta, y que si esta diferencia supera el valor de $3\sigma_{n-1}$, es una medida mala.

Para el caso de la muestra de valores tomada como ejemplo, la diferencia entre X_i y \bar{X} , más alta es de 0,3, y $2\sigma_{n-1} = 0,44$, por tanto todas las medidas son correctas.

Realizando esta prueba para todas las muestras tomadas se dedujo la siguiente tabla.

Tabla 4.19. Resultados obtenidos de muestras de medidas.

\bar{X}	σ_{n-1}	$2\sigma_{n-1}$	$(\bar{X} - X_i)$	Comprobación	$\sigma_{\bar{X}}$
103,3	0,08164966	0,16329932	0,1	Medida Correcta	0,04082483
66,65	0,17320508	0,34641016	0,25	Medida Correcta	0,08660254
80,8	0,14142136	0,28284271	0,2	Medida Correcta	0,07071068
7,15	0,1	0,2	0,15	Medida Correcta	0,05
-5	0,11547005	0,23094011	0,1	Medida Correcta	0,05773503
-0,775	0,17078251	0,34156503	0,225	Medida Correcta	0,08539126
30,6	0,21602469	0,43204938	0,3	Medida Correcta	0,10801234
11	0,14142136	0,28284271	0,2	Medida Correcta	0,07071068
98,625	0,17078251	0,34156503	0,225	Medida Correcta	0,08539126
53	0,21602469	0,43204938	0,3	Medida Correcta	0,10801234
-4,65	0,23804761	0,47609523	0,25	Medida Correcta	0,11902381
35,1	0,11547005	0,23094011	0,1	Medida Correcta	0,05773503
69,7	0,21602469	0,43204938	0,3	Medida Correcta	0,10801234

Como se observa en la tabla 4.19, al verificar si la diferencia más alta de $\bar{X} - X_i$ de cada una de las muestras tomadas a distintos valores era menor a su respectivo $2\sigma_{n-1}$, se pudo ver que todos los valores pueden ser tomados como medidas correctas.

Después de esta comprobación, se procede a calcular, el error cuadrático medio $\sigma_{\bar{X}}$, el cual será útil para encontrar el error definitivo que se puede tener en el sensor. Además se dice que al tomar las medidas antes mencionadas y al realizar correctamente todo el proceso se puede encontrar el porcentaje de probabilidad que el valor real de la medida se encuentre bajo el siguiente parámetro.

- 68,7% de estar entre $X - \sigma_{\bar{X}}$ y $X + \sigma_{\bar{X}}$
- 95,45% de estar entre $X - 2\sigma_{\bar{X}}$ y $X + 2\sigma_{\bar{X}}$
- 99,7% de estar entre $X - 3\sigma_{\bar{X}}$ y $X + 3\sigma_{\bar{X}}$

Esta probabilidad se deduce a través de la denominada curva Gaussiana. La ecuación para encontrar el error cuadrático medio es la siguiente.

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n(n-1)} \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

Por tanto el error cuadrático medio en el ejemplo escogido sería el siguiente.

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{0,216}{\sqrt{4}}$$

$$\sigma_{\bar{X}} = 0,108$$

Al ver los datos de todas las pruebas realizadas en la tabla 4.18, se puede ver que el mayor error cuadrático medio de todas las medidas es, 0,119, si se toma como afirmativo la probabilidad de encontrar el valor real según la curva Gaussiana, se conocería que para cualquier valor que se mida con el sensor de la planta, hay un 99,7% de probabilidad que el valor real se encuentre en $(X \pm 0,357)^\circ C$, tomando como X al valor de temperatura que se muestra en el LCD de la planta.

Para encontrar el error definitivo, en las medidas tomadas se deben tener en cuenta 3 valores fundamentales, el primero es el error promedio obtenido después de corregir los errores sistemáticos, es decir el valor más alto de la diferencia entre el valor de temperatura del patrón y el valor del sensor. Como segundo valor se tiene el mayor error cuadrático medio encontrado en las pruebas realizadas, y como tercer valor se tiene la resolución propia del elemento sensor utilizado.

Tabla 4.20. Errores de la planta

Error	Valor °C
Error más alto entre sensor y patrón	0.4
Mayor Error cuadrático medio	0.119
Resolución del sensor MAX31855	0.25

Luego de tener estos valores el error total, será el valor mayor entre ellos, por tanto para el sensor usado en la planta, el error mayor es 0,4°C. Lo que quiere decir que la precisión que el sensor de la planta puede dar al ser contrastado con otro sensor es de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$. Según, el Centro Español de Metrología, se tienen tres rangos de error definidos en categoría A,B y C, que se puede tener en un sensor, para poder utilizarlo como contraste en diferentes pruebas [11].

La categoría A, habla que sí el lugar donde se va a verificar el correcto funcionamiento de sensores, es en mediciones de temperatura de incubación en las cuales se podría afectar el valor de la concentración catalítica de una enzima o la medición del pH en la sangre se puede tolerar un error mínimo por parte del sensor de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Si el lugar donde se encuentran los sensores a ser probados, es un sitio donde de alguna u otra forma se llegue a tener una incubación de cultivos celulares, entonces se tiene una categoría B, y se acepta un error en el patrón de medida de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Finalmente la categoría C, se refiere a lugares, donde exista otro tipo de medición de temperatura, que no esté contenido en la categoría A y B, en la referencia se habla de por ejemplo sitios de refrigeración, para este caso es aceptable un error de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Si bien la documentación del Centro Español de Metrología, es más adaptada a sitios tipo laboratorio, sirve como referencia para el proyecto, indicando que la precisión de la planta, podría abastecer a una alta gama de sitios para contrastación de sensores como proceso previo a una calibración.

Por su parte en el documento NIST250-35, el NIST (Instituto Internacional de Estándares y Tecnología), presenta la documentación que habla acerca de la incertidumbre máxima permitida en termopares usados como referencia, en procesos de contrastación. En esta documentación se habla que para el rango de temperatura que la planta del proyecto va a controlar, se acepta un error aleatorio, de entre $\pm 0.52^{\circ}\text{C}$ y $\pm 0.72^{\circ}\text{C}$ [12], valores de error que en el proyecto comúnmente no se llega a tener. Incluso se habla de una incertidumbre total permitida de entre -2.04 y +2.43 que viene a ser un valor similar al error de categoría C según el Centro Español de Metrología.

Tabla 4.21. Tabla de errores sistemáticos debido al uso termopares como referencia
NIST250-35 [13]

Temperature degrees C	Limits to Random Error	Systematic Errors Due to Reference Thermocouple		Total Uncertainty
		Fixed Point Calibration	Drift and Inhomogeneity	
100	+0.69	+1.28	+0.46	+2.43
	-0.69	-1.35	-0.00	-2.04
200	+0.84	+1.97	+0.97	+3.78
	-0.84	-2.10	-0.00	-2.94
300	+0.99	+2.07	+1.40	+4.46
	-0.99	-2.24	-0.00	-3.23
400	+1.14	+1.59	+1.75	+4.48
	-1.14	-1.78	-0.00	-2.92
419.58 (Zn)	+1.17	+1.43	+1.81	+4.41
	-1.17	-1.62	-0.00	-2.79
500	+1.29	+1.53	+2.02	+4.84
	-1.29	-1.72	-0.00	-3.01
600	+1.44	+1.58	+2.21	+5.23
	-1.44	-1.76	-0.00	-3.20
630.74	+1.50	+1.58	+2.25	+5.33
	-1.50	-1.75	-0.00	-3.25
700	+1.59	+2.89	+2.31	+6.79
	-1.59	-3.09	-0.00	-4.68
800	+1.74	+3.54	+2.33	+7.61
	-1.74	-3.77	-0.00	-5.51
900	+1.89	+2.73	+2.27	+6.89
	-1.89	-2.98	-0.00	-4.87
961.93 (Ag)	+1.98	+1.49	+2.20	+5.67
	-1.98	1.75	-0.00	-3.73
1000	+2.04	+1.56	+2.13	+5.73
	-2.04	-1.82	-0.00	-3.86
1064.43 (Au)	+2.13	+1.52	+2.00	+5.65
	-2.13	-1.79	-0.00	-3.92
1100	+2.19	+3.10	+1.99	+7.28
	-2.19	-3.40	-0.00	-5.59

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se puede unificar en una sola planta un sistema calentador con un sistema de refrigeración para control de temperatura, siempre y cuando el control de dichos sistemas estén correctamente aislados, del control electrónico, del microcontrolador que gobierna el sistema y del transmisor de temperatura.
- El uso de pulsadores es la manera más efectiva y sencilla para gobernar, el sistema calentador y de refrigeración de una planta de control de temperatura, puesto que al ser un proyecto va a estar al alcance de varios usuarios, se buscó en todo momento tener un sistema sencillo de controlar y fácilmente entendible.
- Los resultados del error obtenidos matemáticamente, a partir de pruebas en la planta, demuestran que el sistema tiene una precisión que es aceptable para los trabajos que se vayan a realizar, en base a una normativa internacional siendo esta la norma ISO9001 [14] y la norma de la NIST para el uso de termopares como referencia en procesos de medición de temperatura.
- El diseño y la manera en cómo han sido distribuidos los elementos eléctricos, electrónicos, indicadores y de control, en toda la planta, hace posible que la misma sea un sistema fácilmente transportable, para que pueda ser usado en distintos lugares.
- El tipo de alimentación de la planta, (alimentación monofásica de corriente alterna de baja tensión), permite que haya una alta probabilidad de hacerla funcionar en prácticamente en cualquier lugar, cumpliendo así con el alcance de tener una planta transportable y que puede ser usada en varios lugares.
- El setpoint o valor de temperatura que se quiera tener en el recipiente con el líquido controlado, es ingresado por medio de pulsadores y visualizado en un LCD, en el

momento de colocar dicho valor, y para llegar y mantener esta temperatura en el líquido el programa automáticamente discierne si es que se debe encender un sistema calentador, un sistema de refrigeración, o apagar ambos.

- Las vainas protectoras no son de mucha utilidad en el caso de tener a una termocupla como medidor instantáneo de temperatura como es el caso de la usada en el proyecto, ya que se pierde la velocidad de captación de la variación de temperatura.
- La regulación del error variante de la temperatura del sensor a través del promedio de los cuadrados de varias medidas, mejora el resultado de la medida, ya que elimina variaciones, indicando únicamente cada cierto número de muestras el dato más próximo referido a todas las muestras tomadas.
- Si se toma una muestra mayor de medidas en el programa para encontrar el valor aproximado, el resultado será erróneo ya que al elevar al cuadrado cada medida de la muestra y realizar una sumatoria, el resultado será mayor al que se puede almacenar en 32Bits, por tanto el programa comenzará a mostrar datos errados.
- Se debe aislar la alimentación del control electrónico de la planta con respecto a la alimentación del sistema de refrigeración, ya que cuando éste enciende, lo hace a una corriente mayor a la de funcionamiento normal, dicho efecto altera la medida del controlador.

5.2. RECOMENDACIONES

- Cuando se tienen sistemas de control de estabilidad de temperatura en cualquier tipo de ambiente, se debe buscar siempre un control automático que garantice, dicha estabilidad.

- Si se pretende implementar un sistema que puede llegar a ser manipulado por una persona sin mucho conocimiento en el control, se debe buscar la manera de tener un sistema de manejo sencillo amigable con el usuario.

- Todo sistema que tenga que ver con calibración, incluso sistemas de uso preventivo como es el caso del presente proyecto, deben actuar acorde a las normas específicas, en este caso, las normas ISO, y las normas NIST.

- Si se va a utilizar una planta para mantenimiento preventivo en varios lugares, se recomienda que dicha planta se tenga un peso aceptable, y que se haya diseñado con dimensiones que la hagan fácil de transportar.

- Una de las principales condiciones que se debe conocer al crear una planta, o un proyecto, es el tipo de alimentación que se va a tener en el lugar donde se vaya a instalar el equipo.

- El sensor que vaya a ser usado como patrón en una planta no debe tener un recubrimiento externo de protección o vaina protectora, ya que aumenta el tiempo de respuesta y puede ocasionar errores en la toma de medidas contrastadas.

- Antes de comprar un elemento que vaya a ser usado como transmisor de cualquier fenómeno físico (en este caso temperatura), se debe conocer los parámetros de precisión, y resolución, que vayan a ser necesarios para el proyecto.

- Se deben tomar todas las precauciones, al realizar la conexión de todos los elementos de la planta, y se deben hacer pruebas siempre en las situaciones más extremas de uso, para asegurar un funcionamiento adecuado.
- Las indicaciones, esquemas en la planta deben ser entendibles, y se debe presentar un respectivo manual del usuario para garantizar el uso adecuado del equipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WHITMAN, W.; JHONSON, W.; 2006, *Tecnología de la Refrigeración y Aire Acondicionado*, primera edición, España, Editorial Thomson.
- [2] NIIR BOARD, 2005, *The Complete Technology Book on Electroplating, Phosphating, Powder Coating And Metal Finishing*, Asia Pacific Business Press Inc. Pp. 35
- [3] NIIR BOARD, 2005, *The Complete Technology Book on Electroplating, Phosphating, Powder Coating And Metal Finishing*, Asia Pacific Business Press Inc. Pp. 35
- [4] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, MAX31855 Manual, 3rd ed., Pp. 1 [Online]. Available: <http://www.adafruit.com/datasheets/MAX31855.pdf>.
- [5] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, MAX31855 Manual, 3rd ed., Pp. 5 [Online]. Available: <http://www.adafruit.com/datasheets/MAX31855.pdf>.
- [6] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, MAX31855 Manual, 3rd ed., Pp. 10 [Online]. Available: <http://www.adafruit.com/datasheets/MAX31855.pdf>.
- [7] OPTO22; 2012, Solid State Relays, [Online]. Available: https://www.opto22.com/documents/0859_Solid_State_Relays_data_sheet.pdf
- [8] ATMEL CORPORATION; Atmega 164p, [Online]. Available: www.atmel.com
- [9] D. RIPPLE; G. W. BURNS; M. G. SCROGER; NISTIR 5340 Assessment of Uncertainties of Thermocouple Calibrations at NIST.
- [10] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, MAX31855 Manual, 3rd ed., Pp. 6 [Online]. Available: <http://www.adafruit.com/datasheets/MAX31855.pdf>.
- [11] SOCIEDAD ESPAÑOLA DE BIOQUÍMICA CLÍNICA Y PATOLOGÍA MOLECULAR, COMITÉ CIENTÍFICO, COMISIÓN DE METROLOGÍA, DOCUMENTO G. FASE 3. VERSIÓN 2.; Procedimiento Recomendado para la Calibración de Termómetros en el laboratorio Clínico.
- [12] The Calibration of thermocouples and thermocouple materials, NIST Special Publication 250-35. Pp.111 Tabla 5.4.

- [13] The Calibration of thermocouples and thermocouple materials, NIST Special Publication 250-35, Pp. 116 Tabla 5.7.
- [14] ISO9001 Numeral 7.6. [Online]. Available: <http://www.normas9000.com>
- [15] DICKERSON, R.E.; GRAY H.R.; DARENSBOURG, M.Y. y DARENSBOURG, 1992, Principios de Química, tercera edición, Barcelona, Ed. Reverté, S.A.
- [16] GALLEO, P.A.; R.M. GARCINUÑO; M.J. MORCILLO; M.A. VÁZQUEZ; 2013, *Química Básica*, Madrid.
- [17] JIMENEZ, F.; 2001, *Termodinámica: Una guía de clase*, Sevilla, Europa Artes Gráficas, S.A.
- [18] INCROPERA, F.P.; 1999, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, cuarta edición, México, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- [19] WHITMAN, W.; JHONSON, W.; 2006, *Tecnología de la Refrigeración y Aire Acondicionado*, primera edición, España, Editorial Thomson.
- [20] NIIR BOARD, 2005, *The Complete Technology Book on Electroplating, Phosphating, Powder Coating And Metal Finishing*, Asia Pacific Business Press Inc.
- [21] FOULLIÉ, A.; 1979, *Compendio de electrotecnia*, Paris, Marcombo, S.A.
- [22] PARDUE, J.; 2005, *C Programming for Microcontrollers*, Knoxville, Smiley Micros.

ANEXOS:

Anexo A. MANUAL DEL USUARIO.

Anexo B. ANÁLISIS DE COSTOS

Anexo C. TRANSMISOR DE TEMPERATURA MAX31855

Anexo D. PROGRAMA DE LA PLANTA EN LENGUAJE C++ CON ATMEL STUDIO

Anexo E. DIAGRAMA DE CONEXIONES DE LA PLACA DE CONTROL

Anexo F. DISEÑO DE PLACA DE CONTROL

Anexo G. PLACA DE CONTROL REALIZADA CON ELEMENTOS BÁSICOS
CONECTADOS

Anexo H. NUMERACIÓN DE CONDUCTORES DEL EQUIPO

Anexo I. DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DE LA PLANTA

ANEXO A
MANUAL DEL USUARIO
PLANTA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA
(BAÑO TÉRMICO)

Símbolos usados en el manual y su significado:

- ! Advertencias, de acciones que podrían causar daño a la planta y personal que se encuentre manipulando o cerca del equipo.
 - ✓ Notas o aspectos que son importantes remarcar.
-
- ! El equipo debe ser operado de acuerdo a las siguientes instrucciones.
 - ! El equipo debería ser utilizado por personal capacitado que tenga continuamente el presente manual.
 - ! Únicamente al personal con el debido conocimiento se le debe permitir operaciones de reparación del equipo.
 - ! Partes o elementos podrían ser reemplazados con criterio técnico y conocimiento de la planta.
 - ! Los líquidos térmicos utilizados en la planta para el control y pruebas no deben tener una tendencia dañina al envase de la planta, y la cañería del evaporador del sistema de refrigeración.
 - ! El equipo no debe ser utilizado a elevadas temperaturas, en ambientes cerrados con presencia de pacientes médicos o con salud frágil.
 - ✓ Se debe tener en cuenta las siguientes características del equipo:

- ✓ El equipo debería conectarse siempre a un sistema con la debida protección a tierra.
- ✓ El equipo no debe ser abierto mientras se encuentra encendido y en funcionamiento.
- ✓ Protección IP20, en concordancia con las normas DIN40050, indicando que el equipo no puede tener intrusión de líquidos, y que impide el ingreso de elementos sólidos mayores a los 12mm de diámetro.
- ✓ No debería ser utilizado el equipo en lugares donde se pueda tener caída de líquidos.

1. Descripción:

La planta de control automático de temperatura o baño térmico es un equipo usado para mantener temperaturas constantes en un intervalo de tiempo, el entorno de temperatura que se va a controlar debe ser un líquido con un punto de fusión bajo, y un punto de ebullición alto, generalmente se usa el etilenglicol.

El presente equipo tiene un rango de control de temperatura comprendido entre -10°C y 120°C .

2. Aplicación:

- Control de temperatura en líquidos en espacios cerrados y abiertos.
- Equipo para procesos de comparación de temperatura fácilmente transportable.

3. Modo de control:

Usando un termopar tipo K como sensor de temperatura, como transmisor de temperatura se emplea el elemento MAX31855, que envía la información de la temperatura de manera digital a un microcontrolador Atmega164p el cual realiza el debido control.

4. Descripción de elementos de control

CAJA DE CONTROL

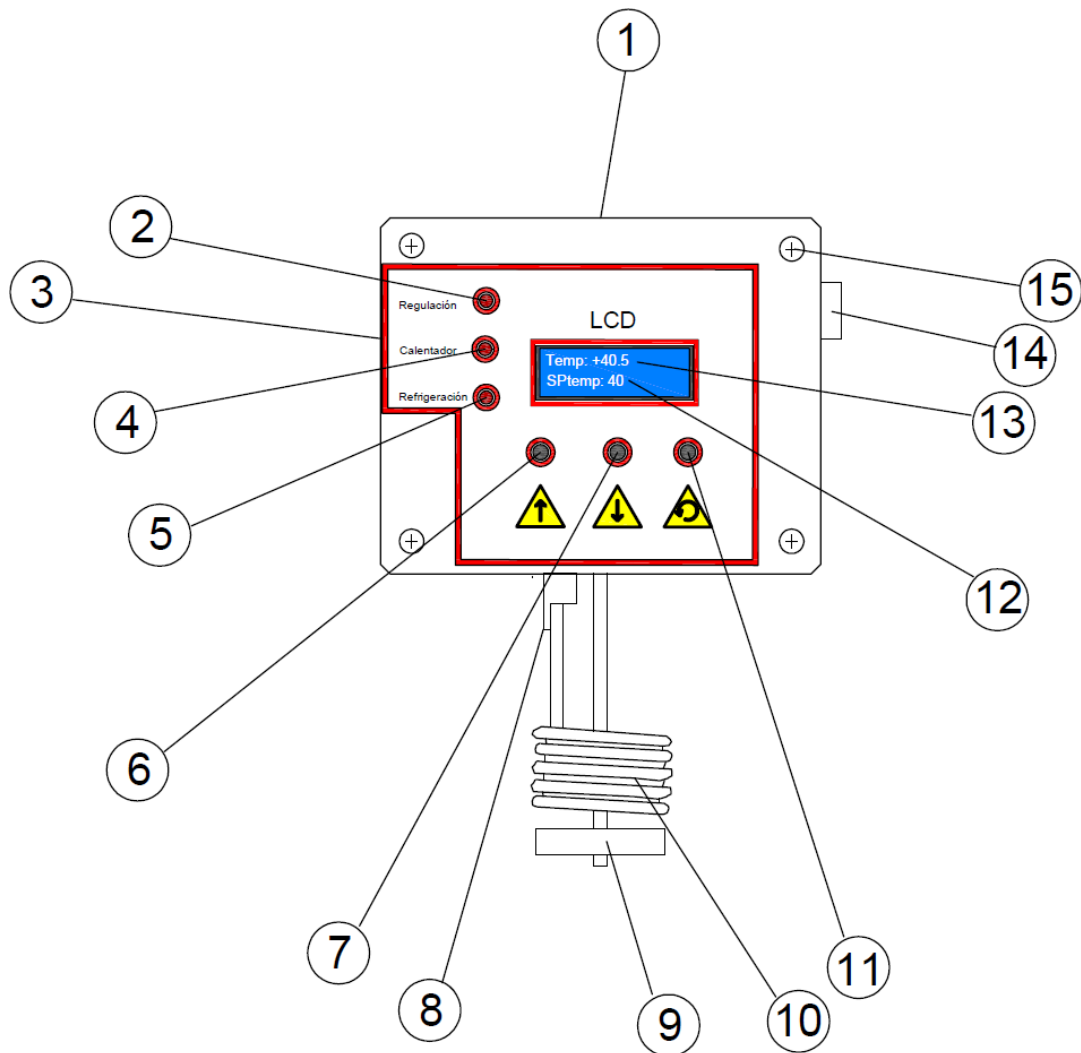


Figura A.1. Descripción Numérica de la Caja de Control.

1. Ventilador 1, éste ventilador se enciende con el interruptor de ventilador 1 y 2 que se encuentra en la estructura de acero inoxidable de la planta, el ventilador 1 junto con el ventilador 2 ayuda a que el sensor MAX31855 de la planta que se encuentra

- en el interior de la caja de control se mantenga a una temperatura constante, o en su defecto no supere temperaturas que puedan causar errores de medida.
2. LED de regulación, éste LED se enciende cuando existe un error en la medida de temperatura por parte del sensor de la planta, es una alerta que indicará al operador que mientras esta luz se mantenga encendida, el valor de la temperatura que se muestra puede no ser la correcta.
 3. Ventilador 2, al igual que el ventilador 1, se enciende con el interruptor de ventilador 1 y 2 que se encuentra en la estructura de acero inoxidable de la planta, el ventilador 2 y 1 ayudan a que el sensor MAX31855 de la planta que se encuentra en el interior de la caja de control se mantenga a una temperatura constante, o en sus defecto no supere temperaturas que puedan causar errores de medida.
 4. LED de calentador, indica que se encuentra encendido y funcionando el sistema calentador del líquido de la planta, cada vez que se encienda éste indicador visual, se debe entender que la resistencia térmica se encuentra funcionando y elevando la temperatura del entorno.
 5. LED de refrigeración, similar al indicador visual LED calentador, este indicador visual, representa el encendido y funcionamiento del sistema de refrigeración.
 6. Pulsador de elevación de setpoint, es un control por pulsador, que sirve para elevar la temperatura de setpoint de la planta, es decir que si teniendo una temperatura determinada, el operador quisiera que el líquido llegue a una temperatura mayor, debería presionar éste pulsador hasta visualizar en la temperatura de setpoint, el valor de temperatura a la que se desea llegar.
 7. Pulsador de disminución de temperatura, es un control por pulsador, que sirve para disminuir la temperatura de setpoint de la planta, es decir que si teniendo una temperatura determinada, el operador quisiera que el líquido llegue a una temperatura menor a la que se encuentra, debería presionar éste pulsador hasta

visualizar en la temperatura de setpoint, el valor de temperatura a la que se quiere llegar.

8. Sujetador del sistema calentador, pieza metálica que mantiene estable y aislado de la caja de plástico a la resistencia térmica, una pieza similar se encuentra conectada en la parte interior de la caja de control, si se quisiera desmontar la resistencia térmica se debería sacar primero las piezas antes mencionadas.
9. Agitador, conectado a un motor de corriente alterna instalado, en la caja de control, la sección numerada, es la hélice que hará que el líquido se encuentre en movimiento dentro del envase, haciendo que la temperatura se distribuya de una manera constante, garantizando el valor de temperatura mostrado en pantalla.
10. Resistencia térmica, es un elemento resistivo hecho de titanio que inmediatamente al paso de una corriente eléctrica, genera una temperatura muy elevada.

! Esta resistencia debe ser activada únicamente cuando se encuentre líquido en el envase de la planta.

11. Botón de reinicio, es un pulsador colocado para que al pulsarlo el sistema vuelva a sus condiciones iniciales, al presionar éste pulsador, el setpoint se colocará automáticamente en 25°C, y el programa inicializará la captura de datos de temperatura de la misma manera que ocurre en los primeros segundos del encendido de la planta.
12. LCD indicador de setpoint, con el nombre **SPtemp**, el valor numérico que se muestra representa, el valor de temperatura que se desea tener en la planta, así por ejemplo como se muestra en la Figura A.1, si se desea tener una temperatura constante de 40°C, en la planta, por medio de los pulsadores de elevación y disminución de temperatura, se buscará que el LCD presente **SPtemp: 40**.

13. LCD indicador de temperatura del líquido en el envase, es la sección del LCD, que presenta el valor real con la precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, de temperatura a la que se encuentra el líquido dentro del envase en la planta, la planta ha sido diseñada para que esta temperatura llegue en todo momento a ser la temperatura de setpoint.
14. En esta parte se encuentra una manguera que va dirigida hasta la parte inferior de la planta, donde se encuentran los relés de control, dentro de esta manguera se encuentran los conductores para accionar la resistencia térmica, el agitador, la alimentación en VDC de la placa de control, la alimentación VDC de los ventiladores 1 y 2, y los conductores que van a la entrada del relé de estado sólido tanto para el sistema de refrigeración como para la resistencia térmica o sistema calentador.
15. Tornillos de sujeción, son los tornillos que sujetan internamente a la placa del control del sistema con la cara frontal de la caja de control donde se encuentran los pulsadores de control, la pantalla LCD, y los LEDs indicadores visuales.

VENTILADORES DE EVACUACIÓN DE GAS

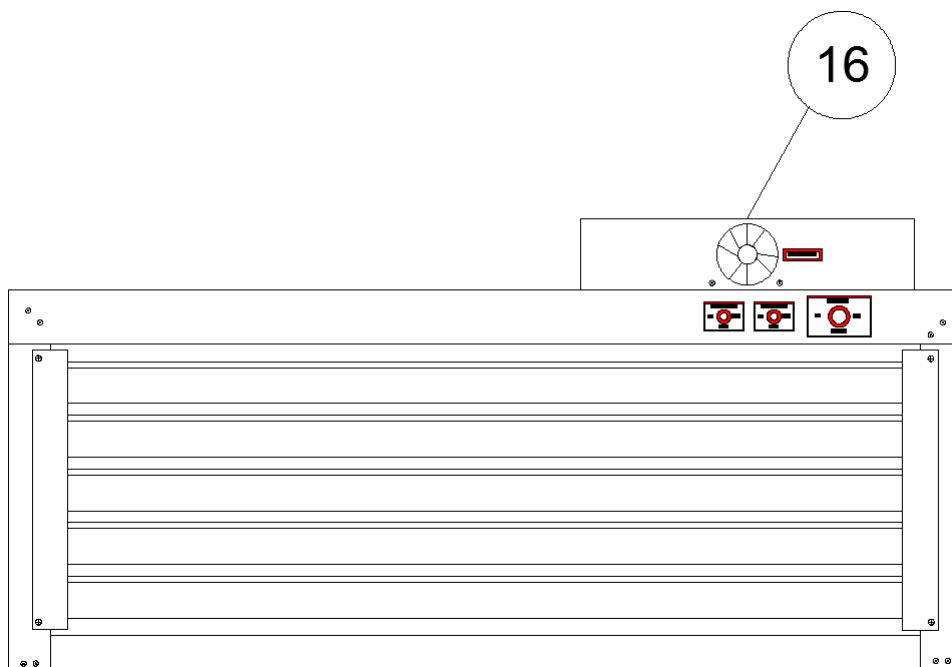


Figura A.2. Ventilador de Evacuación de Gas, Ventilador 3.

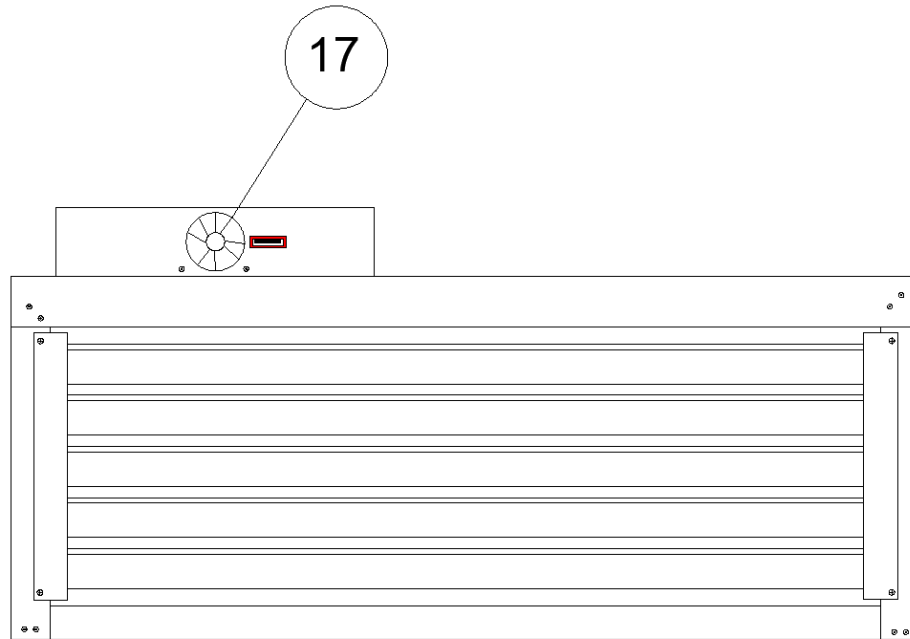


Figura A.3. Ventilador de Evacuación de Gas, Ventilador 4.

16. Ventilador 3, es el encargado de eliminar el gas generado por el líquido en la planta por evaporación, a pesar de que el líquido utilizado, tiene un punto de ebullición elevado; a partir de los 60°C, se pudo notar que comienza a generar una pequeña cantidad de vapor, se recomienda mantener encendido este ventilador, únicamente para controles de temperatura mayor a 50°C, ya que por pruebas realizadas, al mantener encendido el ventilador, en control de temperatura menor que cero, se aumentaba el tiempo de enfriamiento, es decir, se le hacía más difícil a la planta llegar a una temperatura y mantenerse constante, para encender éste ventilador, se coloca en ON, el interruptor Ventilador 3 y 4 de la planta.

17. Ventilador 4, es el encargado de eliminar el gas generado por el líquido en la planta por evaporación, a pesar de que el líquido utilizado, tiene un punto de ebullición elevado; a partir de los 60°C, se pudo notar que comienza a generar una pequeña cantidad de vapor, se recomienda mantener encendido este ventilador, únicamente para controles de temperatura mayor a 50°C, ya que por pruebas

realizadas, al mantener encendido el ventilador, en control de temperatura menor que cero, se aumentaba el tiempo de enfriamiento, es decir se le hacía más difícil a la planta llegar a una temperatura y mantenerse constante, para encender éste ventilador, se coloca en ON, el interruptor Ventilador 3 y 4 de la planta.

CONTROLES DE LA PLANTA

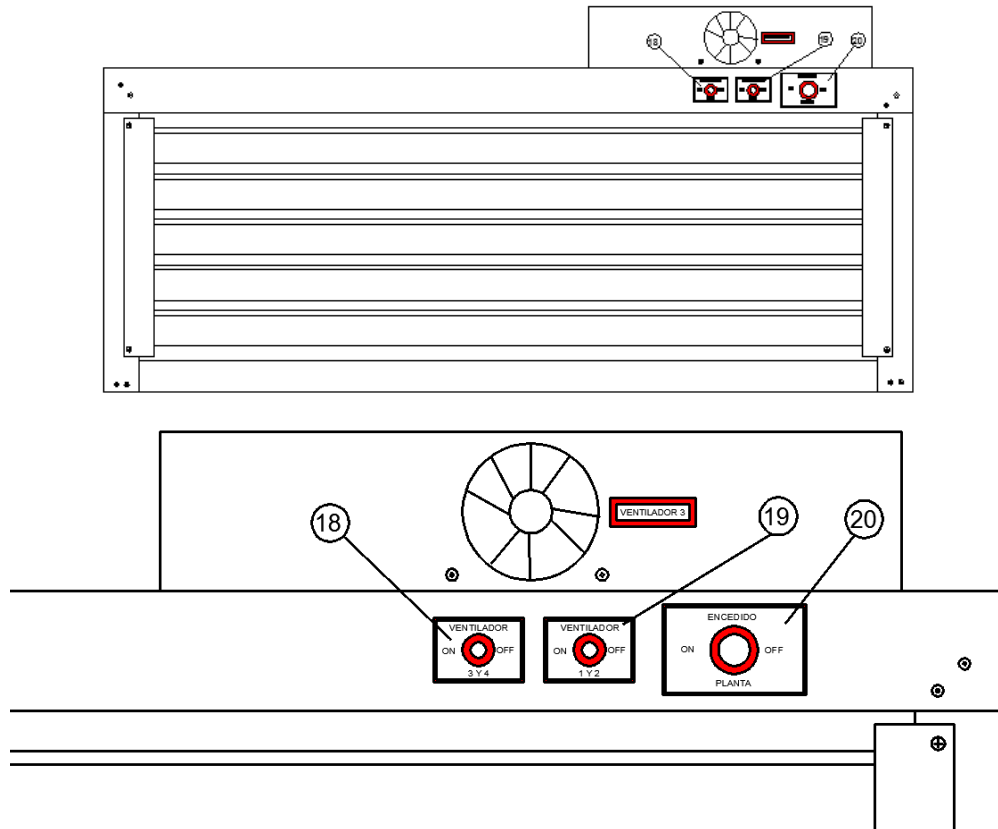


Figura A.4. Descripción Numérica de Controles de la Planta.

18. Interruptor ventilador 3 y 4, al colocar este interruptor en ON, los ventiladores 3 y 4 que son los evacuadores de gas comenzarán a funcionar.

- ✓ Se recomienda encender dichos ventiladores únicamente cuando la temperatura de la planta se encuentre por sobre los 50°C.

19. Interruptor ventilador 1 y 2, al colocar este interruptor en ON, los ventiladores 1 y 2 se encenderán, dichos ventiladores son los que están colocados en la caja de control y siempre deben estar funcionando.

20. Interruptor encendido de la planta, al colocar en ON, el interruptor, la planta se enciende y comienza a funcionar, si este interruptor se encuentra en OFF, no se encenderá ningún elemento del sistema.

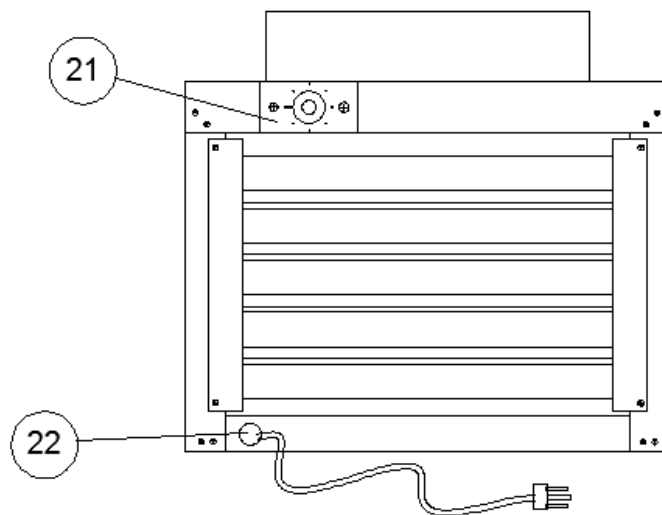


Figura A.5. Descripción Numérica, Elementos Posteriores de la Planta.

21. Control de temperatura de sistema de refrigeración, es el que originalmente controlaba la temperatura en el sistema de refrigeración, este es el control convencional de refrigeradores y congeladores, para que el sistema de refrigeración del equipo comience a actuar, se debe colocar ésta perilla en un número mayor a 7.

22. Cable de conexión de alimentación, cable con enchufe de 120VAC, que es el que permite el ingreso de alimentación para todo el sistema, internamente se tiene un regulador de voltaje para brindar seguridad al sistema en todo momento.

5. Seguridad.

- ! Nunca encienda el calentador del sistema cuando el envase se encuentre sin líquido, ya que la resistencia térmica elevará su temperatura de una manera elevada, lo cual dañará a los elementos de la caja de control.
- ! El sistema de refrigeración de la planta debe ser encendido al menos una hora después de haber sido transportado y colocado en el lugar de mediciones, se podría ocasionar daños en el compresor, mezclas entre el refrigerante y el aceite del compresor.

6. Mantenimiento:

- ✓ Mantenga limpio el recipiente donde se colocará el líquido, cualquier sustancia solida podría ocasionar daños en el agitador, y una sustancia corrosiva dañaría la superficie del agitador.
- ✓ Luego de haber tenido un periodo de más de 48 horas de uso de la planta, se recomienda desmontar la tapa, donde se encuentran los ventiladores 3 y 4, y realizar una limpieza de la superficie.
- ✓ La caja de control puede ser extraída de la planta y colocada a un lado procurando no tensar los cables de conexión que van hacia y desde la parte inferior de la planta.
- ✓ Se debe limpiar el interior de la planta eliminando posibles daños en el sistema, abriendo una de las tapas del equipo.

7. Especificaciones Técnicas.

Tabla A.1. Especificaciones Técnicas de la Planta.

Especificación	Unidad	Equipo
Rango de Temperatura de Operación	°C	-10 a 120
Sistema de refrigeración		Integrado
Precisión	°C	±1
Control de temperatura		Digital
Temperatura presentada en Display		Digital
Sensor de temperatura		Termopar/Termocupla
Grado de protección IP		IP20
Rango de temperatura en el transmisor	°C	10 a 40
Alimentación	VAC	120

ANEXO B

ANÁLISIS DE COSTOS

Tabla B.1. Análisis de Costos.

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO
Electroventilador	Ventilador para eliminar la energía calórica del condensador del sistema de refrigeración	1	40
Condensador	Donde se elimina la energía calórica del sistema de refrigeración	1	60
Compresor	El encargado de comprimir el refrigerante en el sistema de refrigeración	1	120
Cañería Evaporador	Por donde el refrigerante, absorbe la energía calórica del entorno líquido.	1	20
Envase	Envase de acero inoxidable donde se controlará la temperatura del líquido	1	20
Estructura	Estructura de acero inoxidable donde se conecta todos los elementos de la planta	1	200
Caja de control	Caja plástica donde se encuentra la placa de control y otros elementos	1	20
Ventiladores	Ventiladores colocados en distintos lugares con diferentes propósitos	4	30
Agitador	Motor de VAC que sirve de agitador del líquido en el envase	1	30
Placa de control	Placa de control con elementos comunes	1	30
Microcontrolador	Atmega164p donde está el programa del control de la planta	1	10
Transmisor de temperatura	MAX31855 que toma la temperatura por un termopar y la envía al microcontrolador	1	45
Termocupla	Termocupla tipo K con protección, de 1m de largo	1	25
LCD y controles	LCD, LEDS indicadores y pulsadores	-	10
Relé de estado sólido	Relés para control de sistema de refrigeración y calentador	2	60
Relé	Relé electromagnético	1	15
Regulador de Voltaje	Regulador de Voltaje instalado para prevención de sobre voltajes o picos de corriente	1	15
Cable para conexión	Cable para conexión de elementos	1	20
Caja de relés	Caja plástica donde se han instalado los relés	1	20
Trabajo de Ingeniería	Diseño, programación e implementación	1	2000
TOTAL			2790

ANEXO C

TRANSMISOR DE TEMPERATURA MAX31855



19-5793; Rev 2; 2/12

MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

General Description

The MAX31855 performs cold-junction compensation and digitizes the signal from a K-, J-, N-, T-, S-, R-, or E-type thermocouple. The data is output in a signed 14-bit, SPI-compatible, read-only format. This converter resolves temperatures to 0.25°C, allows readings as high as +1800°C and as low as -270°C, and exhibits thermocouple accuracy of $\pm 2^\circ\text{C}$ for temperatures ranging from -200°C to +700°C for K-type thermocouples. For full range accuracies and other thermocouple types, see the [Thermal Characteristics](#) specifications.

Applications

Industrial
Appliances
HVAC
Automotive

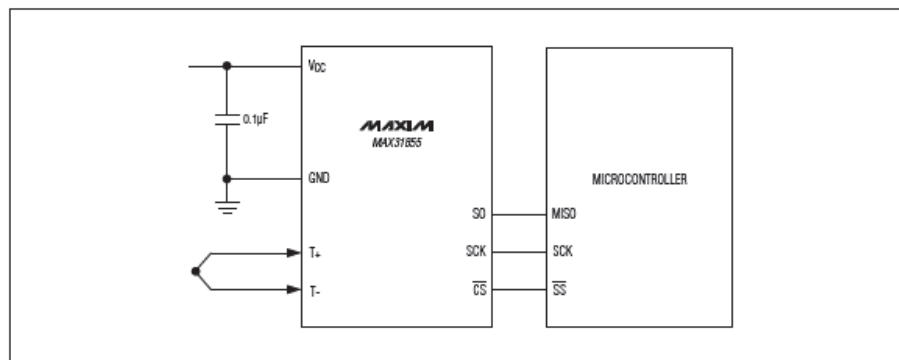
Features

- ◆ Cold-Junction Compensation
- ◆ 14-Bit, 0.25°C Resolution
- ◆ Versions Available for K-, J-, N-, T-, S-, R-, and E-Type Thermocouples (see [Table 1](#))
- ◆ Simple SPI-Compatible Interface (Read-Only)
- ◆ Detects Thermocouple Shorts to GND or VCC
- ◆ Detects Open Thermocouple

[Ordering Information](#) appears at end of data sheet.

For related parts and recommended products to use with this part, refer to: www.maxim-ic.com/MAX31855.related

Typical Application Circuit



Maxim Integrated Products 1

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim Direct at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maxim-ic.com.

MAX31855**Cold-Junction Compensated
Thermocouple-to-Digital Converter****ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Supply Voltage Range (V _{CC} to GND).....	-0.3V to +4.0V	Operating Temperature Range.....	-40°C to +125°C
All Other Pins.....	-0.3V to (V _{CC} + 0.3V)	Junction Temperature.....	+150°C
Continuous Power Dissipation (T _A = +70°C)		Storage Temperature Range.....	-65°C to +150°C
SO (derate 5.9mW/°C above +70°C).....	470.6mW	Lead Temperature (soldering, 10s).....	+300°C
ESD Protection (All Pins, Human Body Model).....	±2kV	Soldering Temperature (reflow).....	+260°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

PACKAGE THERMAL CHARACTERISTICS (Note 1)

SO	
Junction-to-Ambient Thermal Resistance (θ _{JA}).....	170°C/W
Junction-to-Case Thermal Resistance (θ _{JC}).....	40°C/W

Note 1: Package thermal resistances were obtained using the method described in JEDEC specification JESD51-7, using a four-layer board. For detailed information on package thermal considerations, refer to www.maxim-ic.com/thermal-tutorial.

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

(T_A = -40°C to +125°C, unless otherwise noted.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Power-Supply Voltage	V _{CC}	(Note 2)	3.0	3.3	3.6	V
Input Logic 0	V _{IL}		-0.3		+0.8	V
Input Logic 1	V _{IH}		2.1		V _{CC} + 0.3	V

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(3.0V ≤ V_{CC} ≤ 3.6V, T_A = -40°C to +125°C, unless otherwise noted.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Power-Supply Current	I _{CC}			900	1500	μA
Thermocouple Input Bias Current		T _A = -40°C to +125°C, 100mV across the thermocouple inputs	-100		+100	nA
Power-Supply Rejection				-0.3		°C/V
Power-On Reset Voltage Threshold	V _{POR}	(Note 3)		2	2.5	V
Power-On Reset Voltage Hysteresis				0.2		V
Output High Voltage	V _{OH}	I _{OUT} = -1.6mA	V _{CC} - 0.4			V
Output Low Voltage	V _{OL}	I _{OUT} = 1.6mA			0.4	V

MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

THERMAL CHARACTERISTICS

(3.0V ≤ VCC ≤ 3.6V, TA = -40°C to +125°C, unless otherwise noted.) (Note 4)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
MAX31855K Thermocouple Temperature Gain and Offset Error (41.276μV/°C nominal sensitivity) (Note 4)		THERMOCOUPLE = -200°C to +700°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-2		+2	°C
		THERMOCOUPLE = +700°C to +1350°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-4		+4	
		THERMOCOUPLE = -270°C to +1372°C, TA = -40°C to +125°C (Note 3)	-6		+6	
MAX31855J Thermocouple Temperature Gain and Offset Error (57.953μV/°C nominal sensitivity) (Note 4)		THERMOCOUPLE = -210°C to +750°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-2		+2	°C
		THERMOCOUPLE = -210°C to +1200°C, TA = -40°C to +125°C (Note 3)	-4		+4	
MAX31855N Thermocouple Temperature Gain and Offset Error (36.256μV/°C nominal sensitivity) (Note 4)		THERMOCOUPLE = -200°C to +700°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-2		+2	°C
		THERMOCOUPLE = +700°C to +1300°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-4		+4	
		THERMOCOUPLE = -270°C to +1300°C, TA = -40°C to +125°C (Note 3)	-6		+6	
MAX31855T Thermocouple Temperature Gain and Offset Error (52.18μV/°C nominal sensitivity) (Note 4)		THERMOCOUPLE = -270°C to +400°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-2		+2	°C
		THERMOCOUPLE = -270°C to +400°C, TA = -40°C to +125°C (Note 3)	-4		+4	
MAX31855E Thermocouple Temperature Gain and Offset Error (76.373μV/°C nominal sensitivity) (Note 4)		THERMOCOUPLE = -200°C to +700°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-2		+2	°C
		THERMOCOUPLE = +700°C to +1000°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-3		+3	
		THERMOCOUPLE = -270°C to +1000°C, TA = -40°C to +125°C (Note 3)	-5		+5	
MAX31855R Thermocouple Temperature Gain and Offset Error (10.506μV/°C nominal sensitivity) (Note 4)		THERMOCOUPLE = -50°C to +700°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-2		+2	°C
		THERMOCOUPLE = +700°C to +1768°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-4		+4	
		THERMOCOUPLE = -50°C to +1768°C, TA = -40°C to +125°C (Note 3)	-6		+6	
MAX31855S Thermocouple Temperature Gain and Offset Error (9.587μV/°C nominal sensitivity) (Note 4)		THERMOCOUPLE = -50°C to +700°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-2		+2	°C
		THERMOCOUPLE = +700°C to +1768°C, TA = -20°C to +85°C (Note 3)	-4		+4	
		THERMOCOUPLE = -50°C to +1768°C, TA = -40°C to +125°C (Note 3)	-6		+6	

MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

THERMAL CHARACTERISTICS (continued)

($3.0V \leq V_{CC} \leq 3.6V$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.) (Note 4)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Thermocouple Temperature Data Resolution				0.25		$^\circ\text{C}$
Internal Cold-Junction Temperature Error		$T_A = -20^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ (Note 3)	-2		+2	$^\circ\text{C}$
		$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$ (Note 3)	-3		+3	
Cold-Junction Temperature Data Resolution		$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$		0.0625		$^\circ\text{C}$
Temperature Conversion Time (Thermocouple, Cold Junction, Fault Detection)	t_{CONV}	(Note 5)		70	100	ms
Thermocouple Conversion Power-Up Time	t_{CONV_PU}	(Note 6)	200			ms

SERIAL-INTERFACE TIMING CHARACTERISTICS

(See [Figure 1](#) and [Figure 2](#).)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Input Leakage Current	I_{LEAK}	(Note 7)	-1		+1	μA
Input Capacitance	C_{IN}			8		pF
Serial-Clock Frequency	f_{SCL}				5	MHz
SCK Pulse-High Width	t_{CH}		100			ns
SCK Pulse-Low Width	t_{CL}		100			ns
SCK Rise and Fall Time					200	ns
\overline{CS} Fall to SCK Rise	t_{CSS}		100			ns
SCK to \overline{CS} Hold			100			ns
\overline{CS} Fall to Output Enable	t_{OE}				100	ns
\overline{CS} Rise to Output Disable	t_{OD}				40	ns
SCK Fall to Output Data Valid	t_{DO}				40	ns
\overline{CS} Inactive Time		(Note 3)	200			ns

Note 2: All voltages are referenced to GND. Currents entering the IC are specified positive, and currents exiting the IC are negative.

Note 3: Guaranteed by design; not production tested.

Note 4: Not including cold-junction temperature error or thermocouple nonlinearity.

Note 5: Specification is 100% tested at $T_A = +25^\circ\text{C}$. Specification limits over temperature ($T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX}) are guaranteed by design and characterization; not production tested.

Note 6: Because the thermocouple temperature conversions begin at V_{POR} , depending on V_{CC} slew rates, the first thermocouple temperature conversion may not produce an accurate result. Therefore, the t_{CONV_PU} specification is required after V_{CC} is greater than V_{CCMIN} to guarantee a valid thermocouple temperature conversion result.

Note 7: For all pins except T+ and T- (see the Thermocouple Input Bias Current parameter in the [DC Electrical Characteristics](#) table).

MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

Serial-Interface Diagrams

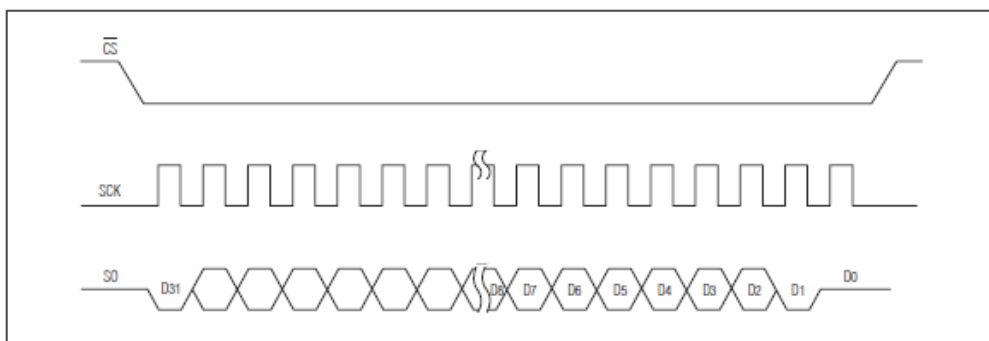


Figure 1. Serial-Interface Protocol

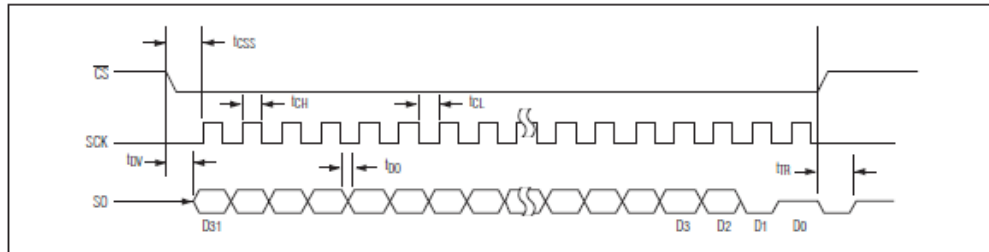


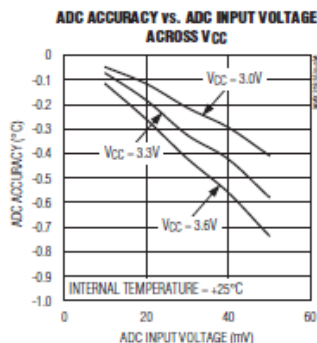
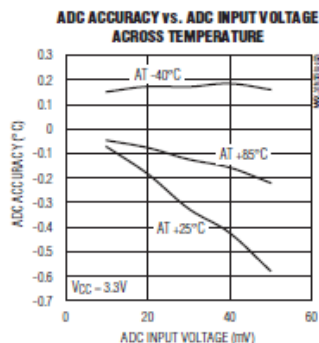
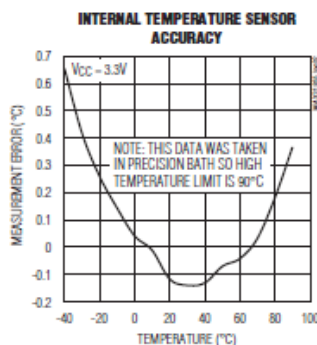
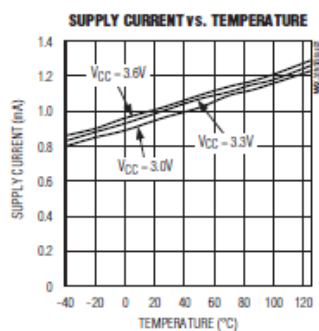
Figure 2. Serial-Interface Timing

MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

Typical Operating Characteristics

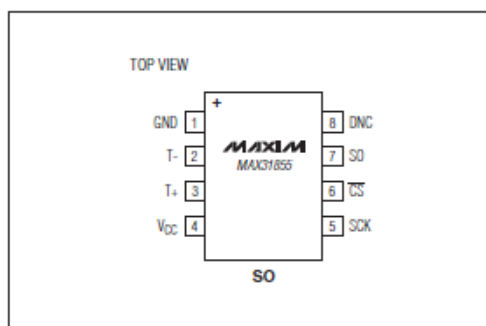
($V_{CC} = +3.3V$, $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.)



MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

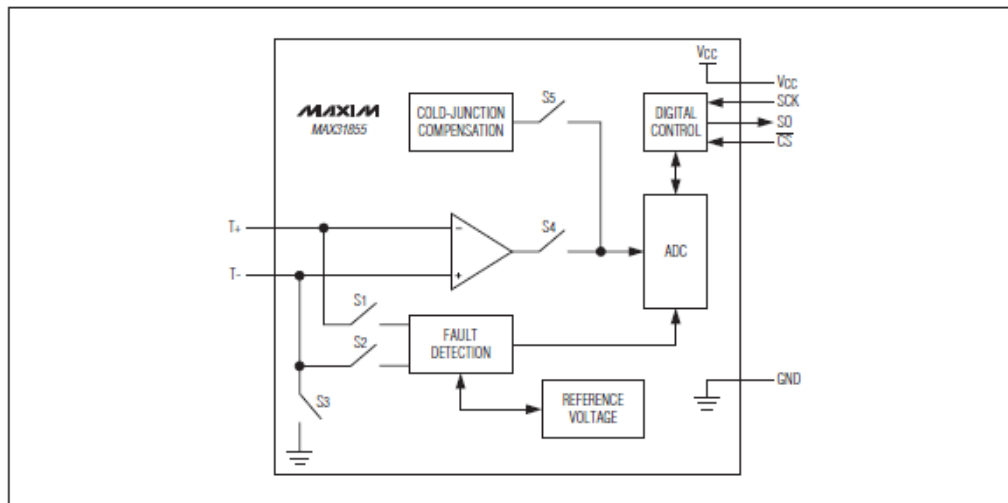
Pin Configuration



Pin Description

PIN	NAME	FUNCTION
1	GND	Ground
2	T-	Thermocouple Input. See Table 1. Do not connect to GND.
3	T+	Thermocouple Input. See Table 1.
4	V _{CC}	Power-Supply Voltage
5	SCK	Serial-Clock Input
6	$\overline{\text{CS}}$	Active-Low Chip Select. Set $\overline{\text{CS}}$ low to enable the serial interface.
7	SO	Serial-Data Output
8	DNC	Do Not Connect

Block Diagram



MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

Detailed Description

The MAX31855 is a sophisticated thermocouple-to-digital converter with a built-in 14-bit analog-to-digital converter (ADC). The device also contains cold-junction compensation sensing and correction, a digital controller, an SPI-compatible interface, and associated control logic. The device is designed to work in conjunction with an external microcontroller (μC) in thermostatic, process-control, or monitoring applications. The device is available in several versions, each optimized and trimmed for a specific thermocouple type (K, J, N, T, S, R, or E.). The thermocouple type is indicated in the suffix of the part number (e.g., MAX31855K). See the [Ordering Information](#) table for all options.

Temperature Conversion

The device includes signal-conditioning hardware to convert the thermocouple's signal into a voltage compatible with the input channels of the ADC. The T+ and T- inputs connect to internal circuitry that reduces the introduction of noise errors from the thermocouple wires.

Before converting the thermoelectric voltages into equivalent temperature values, it is necessary to compensate

for the difference between the thermocouple cold-junction side (device ambient temperature) and a 0°C virtual reference. For a K-type thermocouple, the voltage changes by about $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, which approximates the thermocouple characteristic with the following linear equation:

$$V_{\text{OUT}} = (41.276\mu\text{V}/^\circ\text{C}) \times (T_{\text{R}} - T_{\text{AMB}})$$

where V_{OUT} is the thermocouple output voltage (μV), T_{R} is the temperature of the remote thermocouple junction ($^\circ\text{C}$), and T_{AMB} is the temperature of the device ($^\circ\text{C}$).

Other thermocouple types use a similar straight-line approximation but with different gain terms. Note that the MAX31855 assumes a linear relationship between temperature and voltage. Because all thermocouples exhibit some level of nonlinearity, apply appropriate correction to the device's output data.

Cold-Junction Compensation

The function of the thermocouple is to sense a difference in temperature between two ends of the thermocouple wires. The thermocouple's "hot" junction can be read across the operating temperature range ([Table 1](#)). The reference junction, or "cold" end (which should be at

Table 1. Thermocouple Wire Connections and Nominal Sensitivities

TYPE	T- WIRE	T+ WIRE	TEMP RANGE ($^\circ\text{C}$)	SENSITIVITY ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	COLD-JUNCTION SENSITIVITY ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) (0°C TO $+70^\circ\text{C}$)
K	Alumel	Chromel	-270 to +1372	41.276 (0°C to $+1000^\circ\text{C}$)	40.73
J	Constantan	Iron	-210 to +1200	57.953 (0°C to $+750^\circ\text{C}$)	52.136
N	Nisil	Nicrosil	-270 to +1300	36.256 (0°C to $+1000^\circ\text{C}$)	27.171
S	Platinum	Platinum/Rhodium	+50 to +1768	9.587 (0°C to $+1000^\circ\text{C}$)	6.181
T	Constantan	Copper	-270 to +400	52.18 (0°C to $+400^\circ\text{C}$)	41.56
E	Constantan	Chromel	-270 to +1000	76.373 (0°C to $+1000^\circ\text{C}$)	44.123
R	Platinum	Platinum/Rhodium	-50 to +1768	10.506 (0°C to $+1000^\circ\text{C}$)	6.158

MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

the same temperature as the board on which the device is mounted) can range from -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$. While the temperature at the cold end fluctuates, the device continues to accurately sense the temperature difference at the opposite end.

The device senses and corrects for the changes in the reference junction temperature with cold-junction compensation. It does this by first measuring its internal die temperature, which should be held at the same temperature as the reference junction. It then measures the voltage from the thermocouple's output at the reference junction and converts this to the noncompensated thermocouple temperature value. This value is then added to the device's die temperature to calculate the thermocouple's "hot junction" temperature. Note that the "hot junction" temperature can be lower than the cold junction (or reference junction) temperature.

Optimal performance from the device is achieved when the thermocouple cold junction and the device are at the same temperature. Avoid placing heat-generating devices or components near the MAX31855 because this could produce cold-junction-related errors.

Conversion Functions

During the conversion time, t_{CONV} , three functions are performed: the temperature conversion of the internal cold-junction temperature, the temperature conversion of the external thermocouple, and the detection of thermocouple faults.

When executing the temperature conversion for the internal cold-junction compensation circuit, the connection to signal from the external thermocouple is opened (switch S4) and the connection to the cold-junction compensation circuit is closed (switch S5). The internal T- reference to ground is still maintained (switch S3 is closed) and the connections to the fault-detection circuit are open (switches S1 and S2).

When executing the temperature conversion of the external thermocouple, the connections to the internal fault-detection circuit are opened (switches S1 and S2 in the [Block Diagram](#)) and the switch connecting the cold-junction compensation circuit is opened (switch S5). The internal ground reference connection (switch S3) and the connection to the ADC (switch S4) are closed. This allows the ADC to process the voltage detected across the T+ and T- terminals.

During fault detection, the connections from the external thermocouple and cold-junction compensation circuit to the ADC are opened (switches S4 and S5). The internal ground reference on T- is also opened (switch S3). The connections to the internal fault-detection circuit are closed (switch S1 and S2). The fault-detection circuit tests for shorted connections to VCC or GND on the T+ and T- inputs, as well as looking for an open thermocouple condition. Bits D0, D1, and D2 of the output data are normally low. Bit D2 goes high to indicate a thermocouple short to VCC, bit D1 goes high to indicate a thermocouple short to GND, and bit D0 goes high to indicate a thermocouple open circuit. If any of these conditions exists, bit D16 of the SO output data, which is normally low, also goes high to indicate that a fault has occurred.

Serial Interface

The [Typical Application Circuit](#) shows the device interfaced with a microcontroller. In this example, the device processes the reading from the thermocouple and transmits the data through a serial interface. Drive $\overline{\text{CS}}$ low and apply a clock signal at SCK to read the results at SO. Conversions are always being performed in the background. The fault and temperature data are only be updated when $\overline{\text{CS}}$ is high.

Drive $\overline{\text{CS}}$ low to output the first bit on the SO pin. A complete serial-interface read of the cold-junction compensated thermocouple temperature requires 14 clock cycles. Thirty-two clock cycles are required to read both the thermocouple and reference junction temperatures ([Table 2](#) and [Table 3](#).) The first bit, D31, is the thermocouple temperature sign bit, and is presented to the SO pin within t_{D} of the falling edge of $\overline{\text{CS}}$. Bits D[30:18] contain the converted temperature in the order of MSB to LSB, and are presented to the SO pin within t_{D} of the falling edge of SCK. Bit D16 is normally low and goes high when the thermocouple input is open or shorted to GND or VCC. The reference junction temperature data begins with D15. $\overline{\text{CS}}$ can be taken high at any point while clocking out conversion data. If T+ and T- are unconnected, the thermocouple temperature sign bit (D31) is 0, and the remainder of the thermocouple temperature value (D[30:18]) is 1.

[Figure 1](#) and [Figure 2](#) show the serial-interface timing and order. [Table 2](#) and [Table 3](#) show the SO output bit weights and functions.

MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

Table 2. Memory Map—Bit Weights and Functions

BIT	14-BIT THERMOCOUPLE TEMPERATURE DATA				RES	FAULT BIT	12-BIT INTERNAL TEMPERATURE DATA				RES	SCV BIT	SCG BIT	OC BIT
	D31	D30	...	D18	D17	D16	D15	D14	...	D4	D3	D2	D1	D0
VALUE	Sign	MSB 2^{10} (1024°C)	...	LSB 2^{-2} (0.25°C)	Reserved	1 = Fault	Sign	MSB 2^6 (64°C)	...	LSB 2^{-4} (0.0625°C)	Reserved	1 = Short to V_{CC}	1 = Short to GND	1 = Open Circuit

Table 3. Memory Map—Descriptions

BIT	NAME	DESCRIPTION
D[31:18]	14-Bit Thermocouple Temperature Data	These bits contain the signed 14-bit thermocouple temperature value. See Table 4 .
D17	Reserved	This bit always reads 0.
D16	Fault	This bit reads at 1 when any of the SCV, SCG, or OC faults are active. Default value is 0.
D[15:4]	12-Bit Internal Temperature Data	These bits contain the signed 12-bit value of the reference junction temperature. See Table 5 .
D3	Reserved	This bit always reads 0.
D2	SCV Fault	This bit is a 1 when the thermocouple is short-circuited to V_{CC} . Default value is 0.
D1	SCG Fault	This bit is a 1 when the thermocouple is short-circuited to GND. Default value is 0.
D0	OC Fault	This bit is a 1 when the thermocouple is open (no connections). Default value is 0.

Table 4. Thermocouple Temperature Data Format

TEMPERATURE (°C)	DIGITAL OUTPUT (D[31:18])
+1600.00	0110 0100 0000 00
+1000.00	0011 1110 1000 00
+100.75	0000 0110 0100 11
+25.00	0000 0001 1001 00
0.00	0000 0000 0000 00
-0.25	1111 1111 1111 11
-1.00	1111 1111 1111 00
-250.00	1111 0000 0110 00

Note: The practical temperature ranges vary with the thermocouple type.

Table 5. Reference Junction Temperature Data Format

TEMPERATURE (°C)	DIGITAL OUTPUT (D[15:4])
+127.0000	0111 1111 0000
+100.5625	0110 0100 1001
+25.0000	0001 1001 0000
0.0000	0000 0000 0000
-0.0625	1111 1111 1111
-1.0000	1111 1111 0000
-20.0000	1110 1100 0000
-55.0000	1100 1001 0000

MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

Applications Information

Noise Considerations

Because of the small signal levels involved, thermocouple temperature measurement is susceptible to power-supply coupled noise. The effects of power-supply noise can be minimized by placing a 0.1 μ F ceramic bypass capacitor close to the VCC pin of the device and to GND.

The input amplifier is a low-noise amplifier designed to enable high-precision input sensing. Keep the thermocouple and connecting wires away from electrical noise sources. It is strongly recommended to add a 10nF ceramic surface-mount differential capacitor, placed across the T+ and T- pins, in order to filter noise on the thermocouple lines.

Thermal Considerations

Self-heating degrades the device's temperature measurement accuracy in some applications. The magnitude of the temperature errors depends on the thermal conductivity of the device package, the mounting technique, and the effects of airflow. Use a large ground plane to improve the device's temperature measurement accuracy.

The thermocouple system's accuracy can also be improved by following these precautions:

- Use the largest wire possible that does not shunt heat away from the measurement area.
- If a small wire is required, use it only in the region of the measurement, and use extension wire for the region with no temperature gradient.
- Avoid mechanical stress and vibration, which could strain the wires.
- When using long thermocouple wires, use a twisted pair extension wire.
- Avoid steep temperature gradients.
- Try to use the thermocouple wire well within its temperature rating.
- Use the proper sheathing material in hostile environments to protect the thermocouple wire.
- Use extension wire only at low temperatures and only in regions of small gradients.
- Keep an event log and a continuous record of thermocouple resistance.

MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

Ordering Information

PART	THERMOCOUPLE TYPE	MEASURED TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX31855KASA+	K	-200°C to +1350°C	8 SO
MAX31855KASA+T	K	-200°C to +1350°C	8 SO
MAX31855JASA+	J	-40°C to +750°C	8 SO
MAX31855JASA+T	J	-40°C to +750°C	8 SO
MAX31855NASA+	N	-200°C to + 1300°C	8 SO
MAX31855NASA+T	N	-200°C to + 1300°C	8 SO
MAX31855SASA+	S	+50°C to +1600°C	8 SO
MAX31855SASA+T	S	+50°C to +1600°C	8 SO
MAX31855TASA+	T	-250°C to +400°C	8 SO
MAX31855TASA+T	T	-250°C to +400°C	8 SO
MAX31855EASA+	E	-40°C to +900°C	8 SO
MAX31855EASA+T	E	-40°C to +900°C	8 SO
MAX31855RASA+	R	-50°C to +1770°C	8 SO
MAX31855RASA+T	R	-50°C to +1770°C	8 SO

Note: All devices are specified over the -40°C to +125°C operating temperature range.

+Denotes a lead(Pb)-free/RoHS-compliant package.

T = Tape and reel.

Package Information

For the latest package outline information and land patterns (footprints), go to www.maxim-ic.com/packages. Note that a "+", "#", or "*" in the package code indicates RoHS status only. Package drawings may show a different suffix character, but the drawing pertains to the package regardless of RoHS status.

PACKAGE TYPE	PACKAGE CODE	OUTLINE NO.	LAND PATTERN NO.
8 SO	S8+4	21-0041	90-0096

MAX31855

Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter

Revision History

REVISION NUMBER	REVISION DATE	DESCRIPTION	PAGES CHANGED
0	3/11	Initial release	—
1	11/11	Corrected ESD protection value; added "S" and "R" type specifications	1, 2, 3, 8, 12
2	2/12	Corrected the thermocouple temperature conditions in the <i>Thermal Characteristics</i> table and Table 1; added clarification to the <i>Serial Interface</i> section to help users better understand how to communicate with the device; added a recommendation to add a 10nF differential capacitor to the T+/T- pins in the <i>Noise Considerations</i> section	3, 8, 9, 11

Maxim cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Maxim product. No circuit patent licenses are implied. Maxim reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time. The parametric values (min and max limits) shown in the Electrical Characteristics table are guaranteed. Other parametric values quoted in this data sheet are provided for guidance.

Maxim Integrated Products, 120 San Gabriel Drive, Sunnyvale, CA 94086 408-737-7600 _____ **13**

ANEXO D

PROGRAMA DE LA PLANTA EN LENGUAJE C++ CON ATMEL STUDIO

```

/*
 * Programa1.c
 *
 * Created: 13/03/2014 13:25:15
 * Author: Flavio Llugsi
 */

//Se incluye las librerías
#include <avr/io.h>
#include "config.h"
#include "lcd.h"
#include "lib1.h"
#include <avr/interrupt.h>
#include <util/delay.h>
#include <math.h>
//Ingreso de variables generales
float          dato_adc    ;
float          setpoint;
int            led;
int            d5;

float          tempact1;
int main(void)
{
    //inicio de la interrupción de conversión análogo digital
    adc_init();

    //definición de puertos I/O
    DDRA=(0<<DDA2);
    DDRD=0b11110011;
    DDRB=0b10111000;
    DDRC=0b00000001;

    //Configuración de timers
    TCCR0A= (1<<WGM01) | (0<<WGM00);
    TCCR0B= (0<<WGM02) | (1<<CS02) | (0<<CS01) | (1<<CS00);
    TIMSK0= (1<<OCIE0A);

    //configuración y activación del INT0 e INT1
    EICRA=0b00111010;
    EIMSK |= (1<<INT0);

    EIMSK |= (1<<INT1);

    //configuración SPI
    SPCR = (1<<SPE) | (1<<MSTR) | (1<<SPR0) | (1<<SPR1) | (1<<CPHA);

    //configuración variables
    int32_t          d;
    int              d2;
    int              d3;
    int              d4;
    int32_t          d1;
    float            filtro;
    int              temsig;
    int32_t          tempact;
    float            tempact2;
    int16_t          tempent;
    int16_t          tempdec;
    int16_t          tempent1;
    int16_t          tempdec1;
    float            tempactf;

    int32_t          tempentf;
    int32_t          tempdecf;
    unsigned char   n;
    int32_t          temprom;
    int32_t          temprom1;
    float            compen;
    float            compen1;
    float            compen2;
    int              salto;

    //Configuración puerto B
    PORTB= (1<<PB3);
    PORTB=(1<<PB4);

    //Inicialización de variables
    temprom1=0;
    temprom=0;
    filtro=0;

```

```

d2=0;
d3=0;
d4=0;
tempact1=0;
setpoint=25;

//Activación de interrupciones
sei();

//Inicio del Lazo While
while(1)
{
    //Programación de la entrada análoga para calibrar
    DIDR0=0b1111101;
    ADMUX = (refext|MUXADC1);
    ADCSRA |= ADCSTART;
    //Adquisición de dato por comunicación SPI
    PORTB= (0<<PB3); // Pongo salida cs en bajo
    d = 0; // No tengo ningún valor en d
    for (n=3; n!=0xff; n--)
    {
        SPDR = 0; // Envío un valor nulo
        while ((SPSR & (1<<SPIF)) == 0) ; // Espero hasta tener una transacción completa
        d = (d<<8) + SPDR; // Pongo el siguiente byte del paquete
    }
    PORTB= (1<<PB3); // pongo salida cs en alto

    //Adquisición de valores de temperatura, y juntura
    d1=(d>>18)&(0x7fff); //tomo los 16 bits mas significativos

    //veo el signo del dato
    temsig= (d1>>13)&(0b1);/*d1>>10*/

    //tomo el valor entero de temperatura
    tempent=(d1>>2)&(0b001111111);

    //tomo el valor decimal de temperatura
    tempdec=d1&(0b11);

    //Toma de datos de la union fria
    //valor entero de la union fria
    tempentf=(d>>8)&(0b11111111);

    //valor decimal de la union fria
    tempdecf=(d>>4)&(0b1111);
    tempdecf=tempdecf*625;
    tempdecf=tempdecf/100;

    //valor complementado y completo
    tempactf=(tempentf*100)+tempdecf;

    //compensación de la juntura
    compen=0.25*(tempactf/100)-5;
    //compen=(compen)*100;
    compen=(3)*100;

    if (temsig==0)
    {
        // Tomo el valor entero X 100 de la temperatura y resto la compensación de la juntura
        tempent=tempent;
        tempdec=tempdec*25;
        tempact=tempent*100+tempdec;
        tempact=tempact+compen-compen2;

        //el valor definitivo es tempact1 con ese se realiza todas las acciones
        tempent1=tempact1/100;
        tempdec1=tempact1-(tempent1*100);
        tempdec1=tempdec1/10;
        tempdec1=abs(tempdec1);

        //indico en un display los fenómenos
        lcd_init(LCD_DISP_ON);
        lcd_gotoxy(0,0);
        lcd_puts("Temp:");

        lcd_puts("+");
        lcd_write_value(tempent1,3);
        lcd_puts(".");
        lcd_write_value(tempdec1,1);
        lcd_puts(" ");
        lcd_write_value((tempactf),4);
        lcd_gotoxy(0,1);
        lcd_puts("SPtemp:");
        lcd_write_value(setpoint,5);
    }
}

```

```

//elevacion al cuadrado, y suma al promedio
tempact=tempact*tempact;
d2=d2++;
temprom=temprom+tempact;

if (d2>13)
{
//cumplidos 13 pasos, saco el valor del promedio de los cuadrados y saco la raiz
temprom=temprom/14;
temprom=sqrt(temprom);
tempact1=temprom;
tempact1=tempact1/100;

//compensacion de minimos cuadrados por pendiente
tempact1=(tempact1*100)+100*((0.082*tempact1)+(0.193));

//filtro pasa bajos
filtro=(filtro*0.7)+tempact1*(1-0.7);
tempact1=filtro;

//Reiniciación de toma de datos del filtro por seguridad
if (d4>12)
{
d3=0;
d4=0;
}

//barrera de impedimento de saltos
d3=d3++;
if (d3>10)
{
if ((tempact1<(tempact2+60))&(tempact1>(tempact2-60)))
{
tempact1=tempact1;
salto=0;
}
else
{
tempact1=tempact2;
//corrección en el caso de detencion de la medicion por saltos
d4=d4++;
salto=1;
}
d3=30;
}
tempact2=tempact1;
temprom=0;
d2=0;
}
}
//AQUI COMIENZA EL ANÁLISIS EN NEGATIVO
else
{
tempdec=~tempdec;

tempdec=tempdec & 0b11;
tempdec=tempdec*25+25;
tempent=~tempent;
tempent=tempent & 0b1111;
//el valor definitivo es tempact1 con ese se realiza todas las acciones
if (tempdec>75)
{
tempent=tempent+1;
}
else
{
tempent=tempent;
}
tempact=tempent*100+tempdec;
tempact=tempact+compent1;
tempent1=tempact1/100;
tempdec1=tempact1-(tempent1*100);
tempent1=abs(tempent1);
tempdec1=tempdec1/10;
tempdec1=abs(tempdec1);

//indico en un display los fenómenos
lcd_init(LCD_DISP_ON);
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_puts("Temp:");
if (tempact1>0)
{

```

```

    lcd_puts("+");
  }
  else
  {
    lcd_puts("-");
  }
  lcd_write_value(tempent1,3);
  lcd_puts(".");
  lcd_write_value(tempdec1,1);
  lcd_puts(" ");
  lcd_write_value(tempactf,4);
  lcd_gotoxy(0,1);
  lcd_puts("SPtemp:");
  lcd_write_value(setpoint,5);
  tempact=tempact*tempact;
  d2=d2++;
  temprom=temprom+tempact;

if (d2>13)
{
  //cumplidos 13 pasos, saco el valor del promedio de los cuadrados y saco la raiz
  temprom=temprom/14;
  temprom=sqrt(temprom);
  tempact1=temprom;
  //Filtro pasa bajos
  filtro=(filtro*0.7)+tempact1*(1-0.7);
  tempact1=filtro;

  //Compensación del error por constante
  tempact1=tempact1-200;

  //Reiniciación de toma de datos del filtro por seguridad
  if (d4>12)
  {
    d3=0;
    d4=0;
  }
  //barrera de impedimento de saltos
  d3=d3++;
  if (d3>10)
  {
    if ((tempact1<(tempact2+60))&(tempact1>(tempact2-60)))
    {
      tempact1=tempact1;
      salto=0;
    }
    else
    {
      tempact1=tempact2;
      //corrección en el caso de detención de la medición por saltos
      d4=d4++;
      salto=1;
    }
    d3=30;
  }

  tempact2=tempact1;
  temprom=0;
  d2=0;
  tempact1=-tempact1;
}
}
// Pequeño retardo de corrección de error
_delay_ms(50);
//aquí se realiza ya el control
// Se define la lógica de utilización de calentamiento o refrigeración
if (setpoint>=23)
{
  //Uso de calentador
  //Logica de control para temperaturas mayores a 70 grados
  if (setpoint<70)
  {
    if (tempact1>((setpoint+0.1)*100))
    {
      PORTD=(0<<PD4)|((~salto & 0)<<PD5)|(salto<<PD6) ;
    }
  }

  if(tempact1<=((setpoint-0.1)*100))
  {
    PORTD=(0<<PD4)|((~salto & led)<<PD5)|(salto<<PD6) ;
  }
}
}

```

```

    }
    //Lógica de control para temperaturas menores a 70 grados
    else
    {
        if (tempact1>((setpoint+0.5)*100))
        {
            PORTD=(0<<PD4)|((~salto & 0)<<PD5)|(salto<<PD6);
        }
        if(tempact1<=((setpoint)*100))
        {
            PORTD=(0<<PD4)|((~salto & led)<<PD5)|(salto<<PD6);
        }
    }
}
else
//uso de enfriador
{
    //logica de control para temperaturas menores a cero grados
    if (tempact1>0)
    {
        if (tempact1>((setpoint+0.4)*100))
        {
            PORTD=(1<<PD4)|(0<<PD5)|(salto<<PD6);
            compen1=0;
            compen2=70;
        }
        if (tempact1<=((setpoint+0.3)*100))
        {
            PORTD=(0<<PD4)|(0<<PD5)|(salto<<PD6);
            compen1=0;
            compen2=0;
        }
    }
    //Logica de control para temperaturas mayores a cero grados
    else
    {
        if (tempact1>((setpoint+0.3)*100))
        {
            PORTD=(1<<PD4)|(0<<PD5)|(salto<<PD6);
            compen1=110;
            compen2=0;
        }
        if (tempact1<=((setpoint-0.3)*100))
        {
            PORTD=(0<<PD4)|(0<<PD5)|(salto<<PD6);
            compen1=0;
            compen2=0;
        }
    }
    //Lógica de control para temperaturas iguales a cero
    if (setpoint==0)
    {
        if (tempact1>((setpoint+0.3)*100))
        {
            if (salto==0)
            {
                PORTD=(1<<PD4)|(0<<PD5)|(salto<<PD6);
            }
            else
            {
                PORTD=(0<<PD4)|(0<<PD5)|(salto<<PD6);
            }
            compen1=0;
        }
        if (tempact1<=((setpoint)*100))
        {
            PORTD=(0<<PD4)|(0<<PD5)|(salto<<PD6);
            compen1=0;
        }
    }
}
OCR0A= 249;
//correccion si es mayor o menor que cero la temperatura
}
//interrupcion subir variable
//subida
ISR (INT0_vect)
{
    _delay_ms(150);
    setpoint=setpoint++;
    _delay_ms(150);
}

```



```

}
//bajada
ISR (INT1_vect)
{
    _delay_ms(150);
    setpoint=setpoint--;
    _delay_ms(150);
}
//Interrupción de conatdor
ISR (TIMER0_COMPA_vect)
{
    d5=d5++;
    if (d5>150)
    {
        d5=0;
    }
    if (setpoint<71)
    {
        if (d5<((1.5+setpoint - (tempact1/100))*25))
        {
            led=1;
        }
        if (d5>= ((1.5+setpoint - (tempact1/100))*25))
        {
            led=0;
        }
    }
    else
    {
        if (d5<((3.5+setpoint - (tempact1/100))*25))
        {
            led=1;
        }
        if (d5>= ((3.5+setpoint - (tempact1/100))*25))
        {
            led=0;
        }
    }
}
ISR (ADC_vect)
{
    dato_adc = ADCH;
    dato_adc=dato_adc/2.55;
}

```

ANEXO E

DIAGRAMA DE CONEXIONES DE LA PLACA DE CONTROL

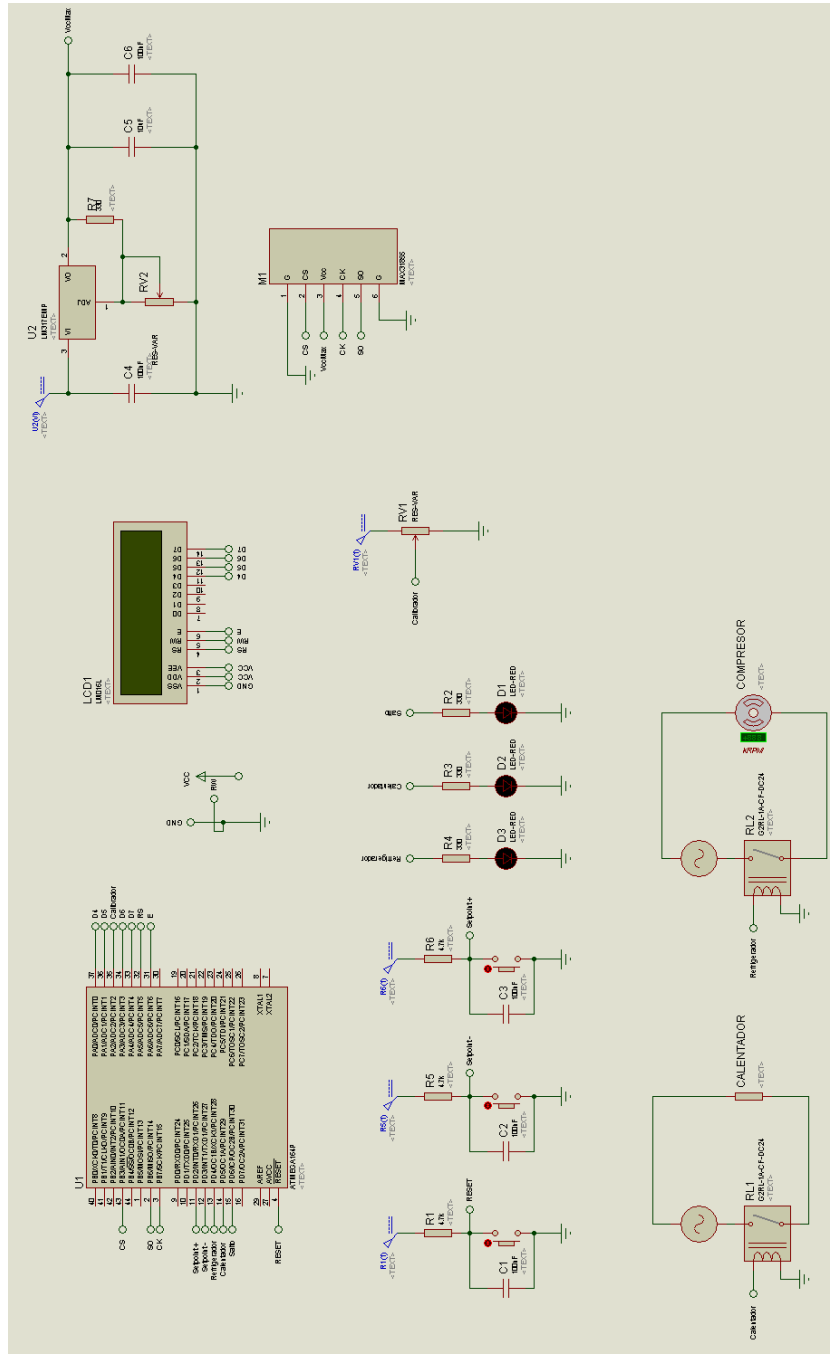


Figura E.1. Diagrama de Conexiones de la Placa de Control

ANEXO F

DISEÑO DE PLACA DE CONTROL

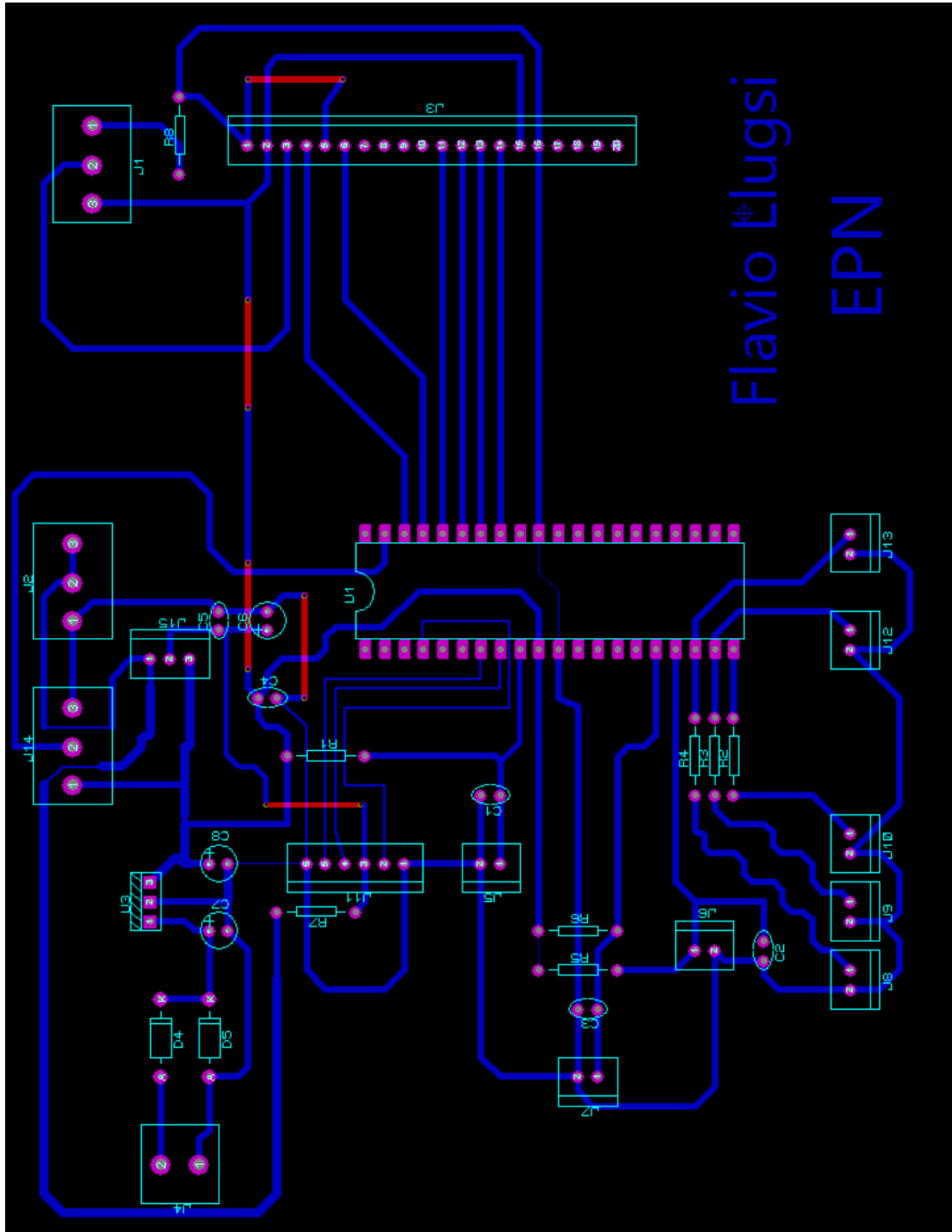


Figura F.1. Diseño de Placa de Control

ANEXO G
PLACA DE CONTROL REALIZADA CON ELEMENTOS
BÁSICOS CONECTADOS

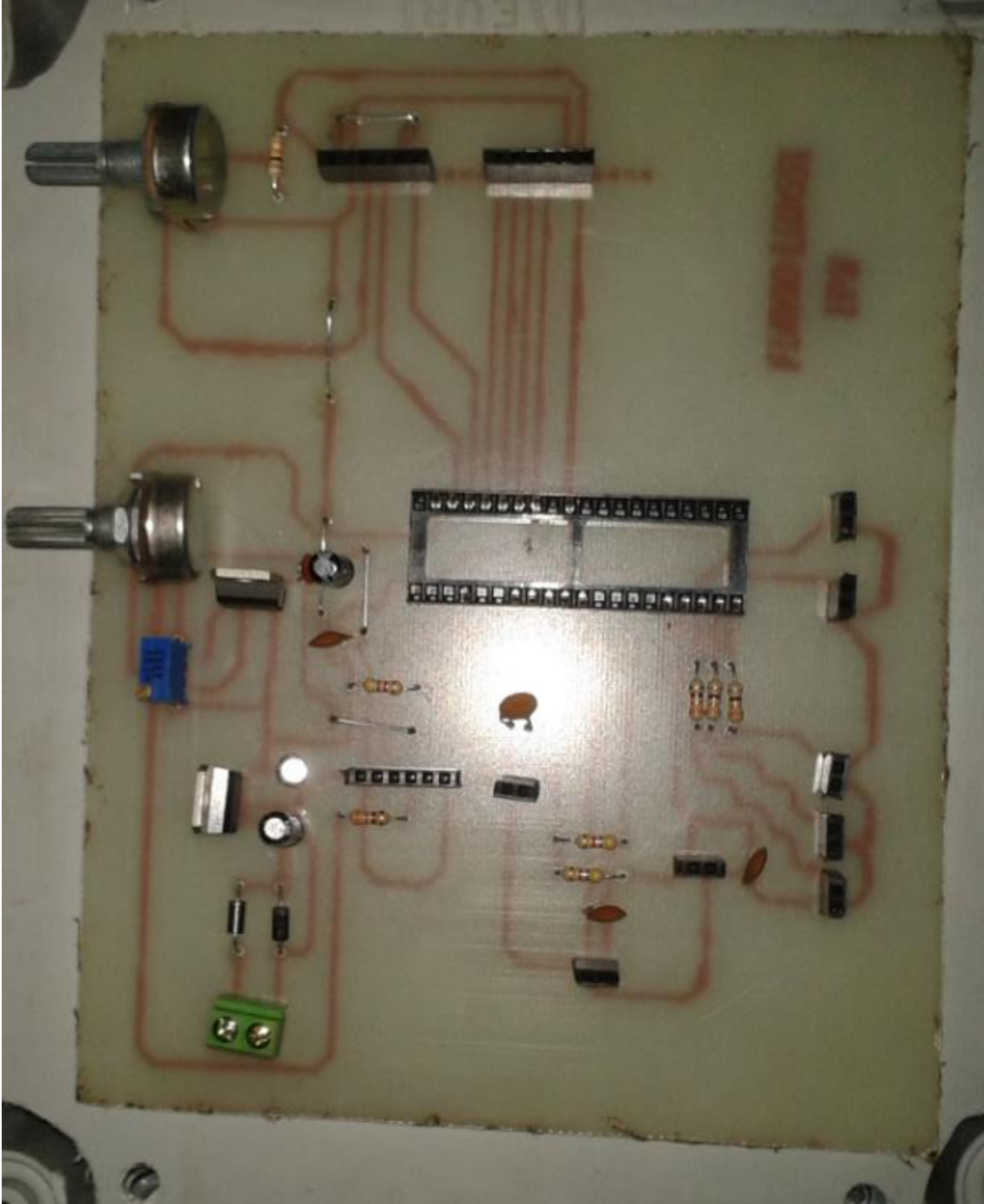


Figura G.1. Placa de Control Realizada

ANEXO H

NUMERACIÓN DE CONDUCTORES DEL EQUIPO

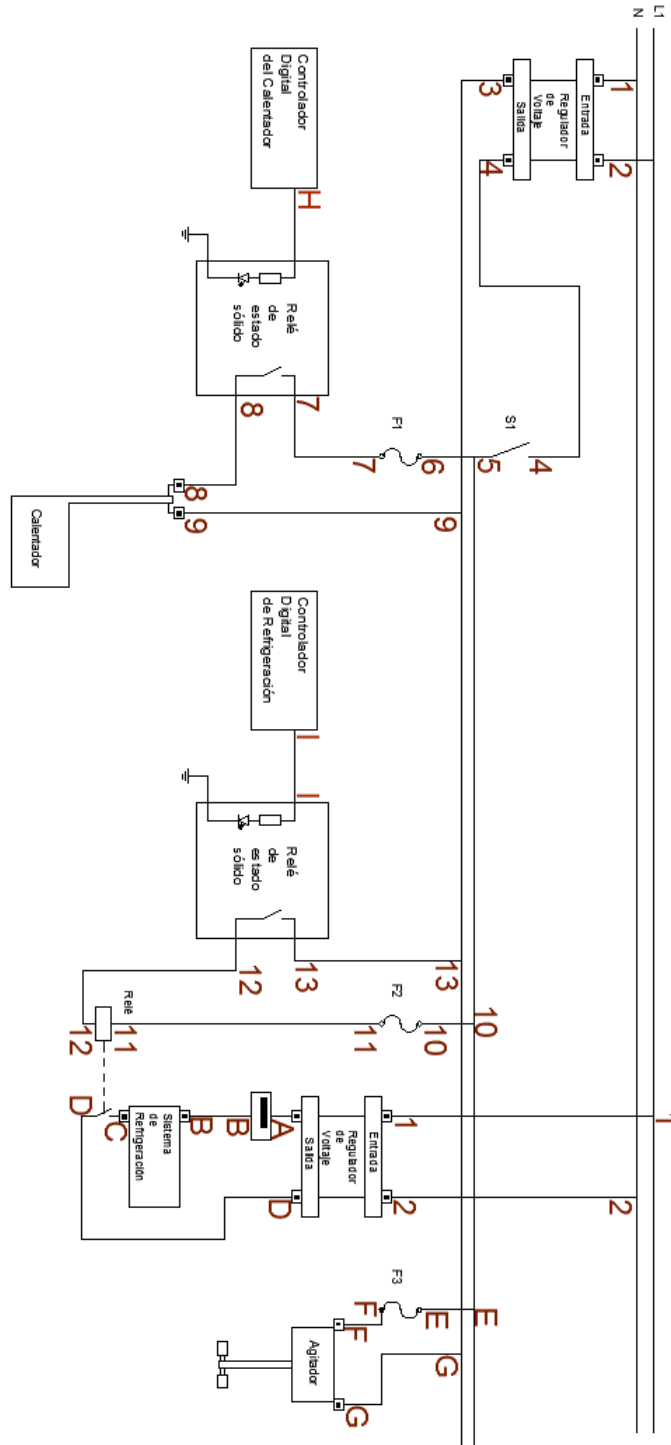


Figura H.1. Numeración de Conductores en la Planta.

ANEXO I

DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DE LA PLANTA

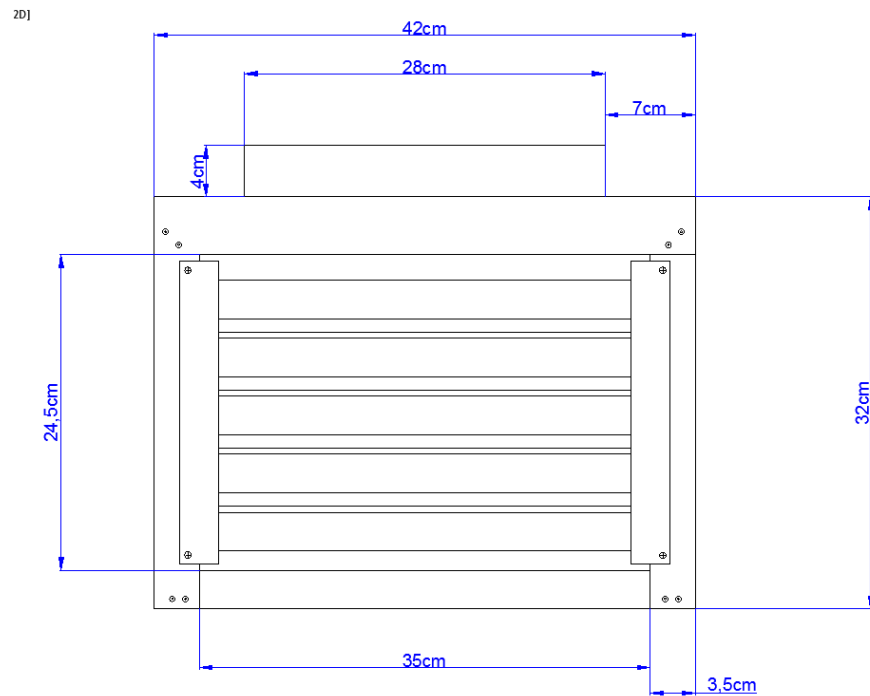


Figura I.1. Dimensiones Vista Frontal.

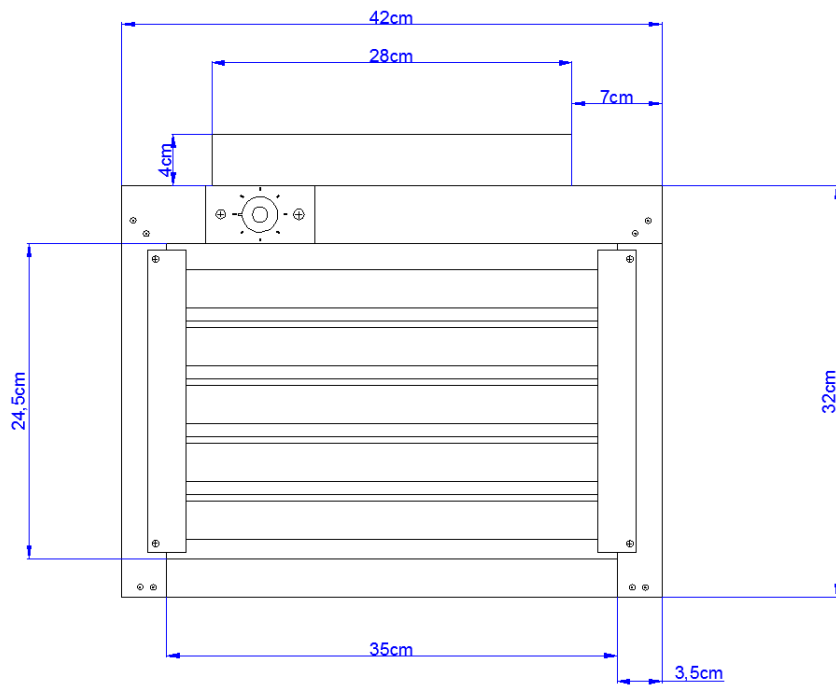


Figura I.2. Dimensiones Vista Posterior.

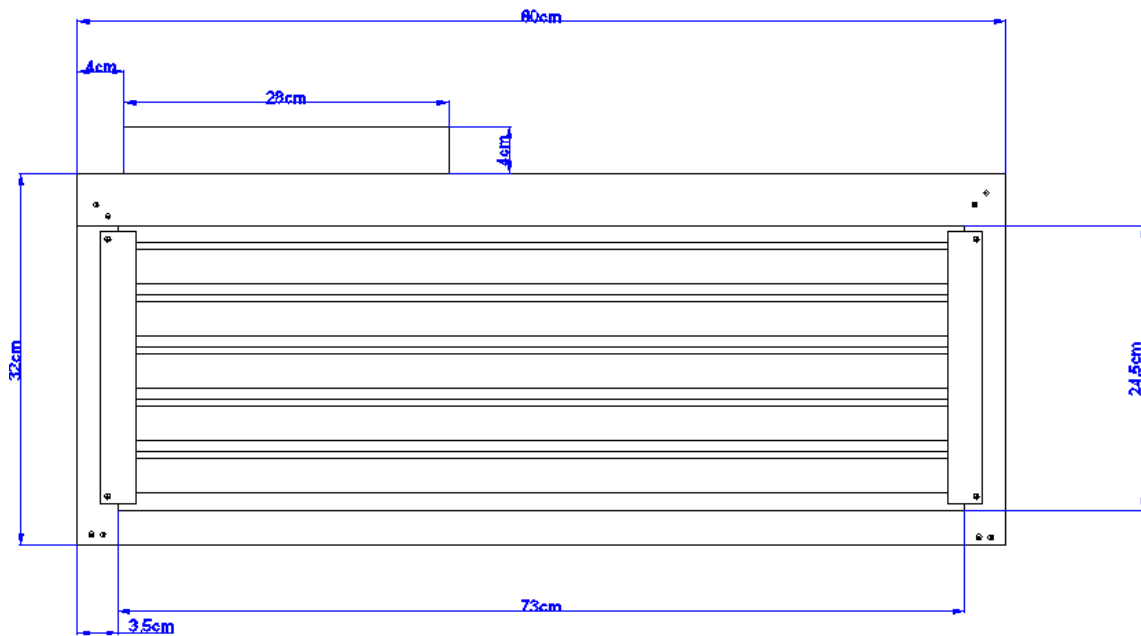


Figura I.3. Dimensiones Vista Lateral 1.

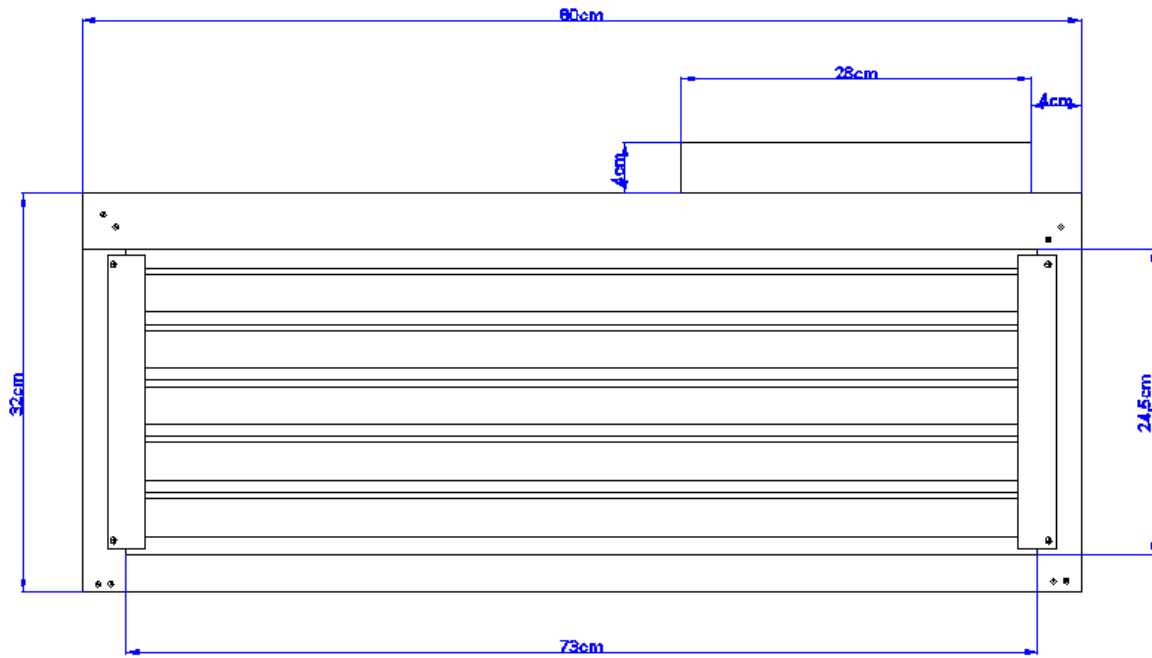


Figura I.4. Dimensiones Vista Lateral 2.

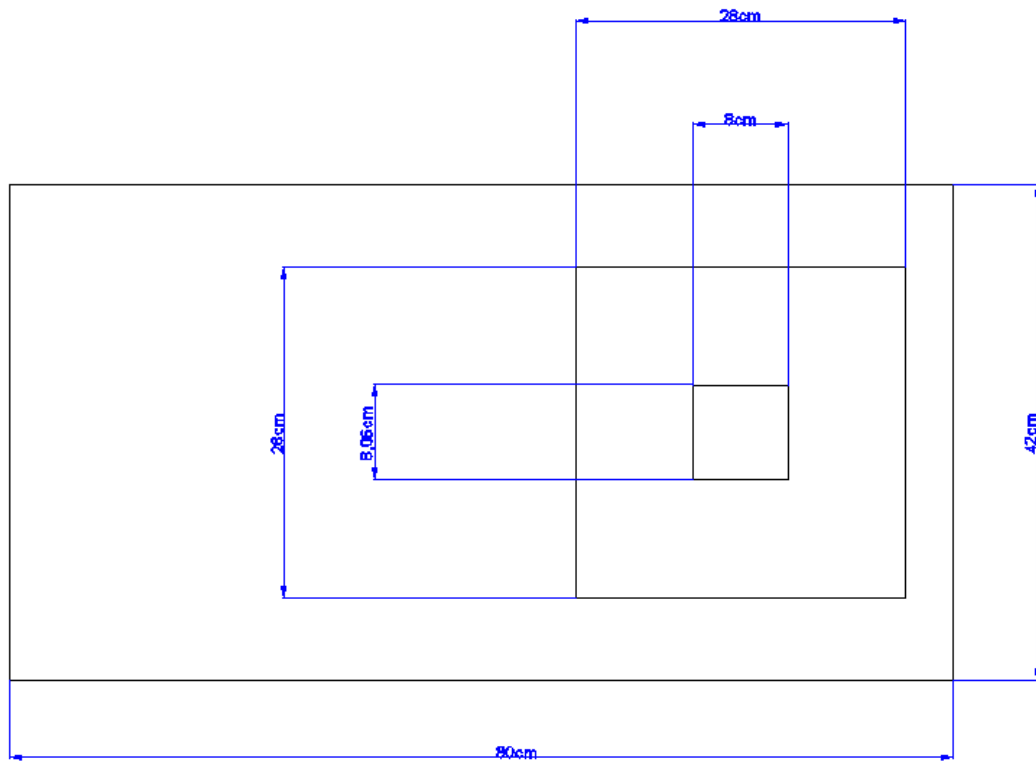


Figura I.5. Dimensiones Vista Superior.