

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

DISEÑO DEL SUBSISTEMA MECÁNICO - ELÉCTRICO PARA UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UN TANQUE

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

Mario Oliver Martínez Mejía

ASESOR: Julio Cesar Tafur Sotelo

Lima, 09 de Julio del 2012

RESUMEN

En la actualidad la influencia que existe por parte de los sistemas de control sobre las diversas ramas de la ingeniería ha ido en aumento; por lo que se está convirtiendo en un elemento útil y de necesidad primordial para su difusión y enseñanza. Una manera óptima de reflejar estos conocimientos hacia los estudiantes es mediante el uso de módulos educativos de sistemas de control.

Un caso particular, son los módulos de control de temperatura, los cuales cuentan con diversas características técnicas y científicas, a su vez proporcionan a los docentes una herramienta didáctica y práctica para la enseñanza. Los sistemas de control de temperatura cuentan con sensores dispuestos en la planta los cuales proveen de señales eléctricas a un interfaz conectada a un controlador, este a su vez, se encargará de procesar los datos y enviará señales hacia los actuadores instalados también en la planta. Su practicidad se basará en contar con un diseño el cual permita su conexión con controladores PC's, a su vez la reducción de costos para el desarrollo e implementación se basaría en aplicar criterios de selección adecuados sobre los elementos que componen el sistema.

La presente tesis tiene como objetivo el diseño del subsistema mecánico y eléctrico correspondiente a la planta diseñada y su interconexión con un interfaz hacia una computadora personal mediante una tarjeta de adquisición de datos.

El documento se compone de cuatro capítulos. En el primer capítulo se establece el Estado del Arte de los módulos de Control de Temperatura. En el segundo capítulo se muestra la Descripción del Sub-sistema Mecánico y Eléctrico que forman parte del Sistema de Control. En el tercer capítulo se propone el diseño de cada subsistema. Y en el cuarto capítulo, se realizan pruebas y simulaciones de los diseños propuestos.

Se concluye que la propuesta de diseño cumple con los requerimientos para las distintas etapas que componen el sistema, y a un menor precio que los del mercado internacional.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño del SubSistema Mecánico - Eléctrico para un Sistema de Control de Temperatura de un Tanque.

Índice

Introducción

1. Estado del arte de los módulos educativos para sistemas de control de temperatura
2. Descripción del Subsistema Mecánico - Eléctrico
3. Diseño del Subsistema Mecánico - Eléctrico
4. Pruebas y Resultados

Conclusiones

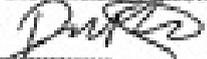
Recomendaciones

Bibliografía

Anexos



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA


Ing. ANDRES FLORES ESPINOZA
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño del SubSistema Mecánico - Eléctrico para un Sistema de Control de Temperatura de un Tanque.
Área : Control y Automatización # 807
Asesor : Ing. Julio Tafur Sotelo
Alumno : Mario Oliver Martínez Mejía
Código : 20054003
Fecha : 18/05/10



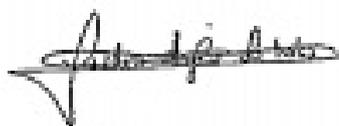
Descripción y Objetivos

En la actualidad la influencia que existe por parte de los sistemas de control sobre las diversas ramas de la ingeniería ha ido en aumento; por lo que se esta convirtiendo en un elemento útil y de necesidad primordial para su difusión y enseñanza. Una manera óptima de reflejar estos conocimientos hacia los estudiantes es mediante el uso de módulos educativos de sistemas de control.

Un caso particular, son los módulos de control de temperatura, los cuales cuentan con diversas características técnicas y científicas, a su vez proporcionan a los docentes una herramienta didáctica y práctica para la enseñanza. Los sistemas de control de temperatura cuentan con sensores dispuestos en la planta los cuales proveen de señales eléctricas a un interfaz conectada a un controlador, este a su vez, se encargará de procesar los datos y enviará señales hacia los actuadores instalados también en la planta. Su practicidad se basaría en contar con un diseño el cual permita su conexión con controladores como PLC's, o PC's , a su vez la reducción de costos para el desarrollo e implementación se basaría en aplicar criterios de selección adecuados sobre los elementos que componen el sistema.

La presente tesis tiene como objetivo el diseño del subsistema mecánico y eléctrico correspondiente a la planta diseñada y su interconexión con un interfaz hacia un PLC o una computadora personal mediante una tarjeta de adquisición de datos.

El desarrollo de este subsistema mecánico - eléctrico incluye las etapas de descripción del sistema, análisis de las propuestas para escoger elementos adecuados, el diseño del subsistema y por último, se realizan pruebas para demostrar la operatividad del diseño.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE DE LOS MÓDULOS EDUCATIVOS PARA SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA	10
1.1 MÓDULOS DE SISTEMAS DE CONTROL	10
1.2 TECNOLOGÍAS APLICADAS EN SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA	11
1.3 MODELO TEÓRICO	14
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL SUBSISTEMA MECÁNICO - ELÉCTRICO	16
2.1 HIPÓTESIS	16
2.1.1 HIPÓTESIS PRINCIPAL	16
2.1.2 HIPÓTESIS SECUNDARIA	16
2.2 OBJETIVOS	16
2.2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	17
2.3.1 PLANTA	18
2.3.2 VARIABLE DE PROCESO	18
2.3.3 SENSOR DE TEMPERATURA	21
2.3.4 ACTUADORES	22
2.3.4.1 ACTUADOR DE CALENTAMIENTO	22
2.3.4.2 ACTUADOR DE ENFRIAMIENTO	23
2.3.4.3 ACTUADOR DE AGITACIÓN	25
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SUBSISTEMA MECÁNICO Y ELÉCTRICO	26
3.1 INTRODUCCIÓN	26
3.2 CONDICIONES DE SITIO	26
3.3 CRITERIOS DE DISEÑO	27
3.3.1 PROCESOS	27
3.3.2 MECÁNICA	30
3.3.3 ESTRUCTURA	31
3.3.4 ELÉCTRICA	32
3.3.5 INSTRUMENTACIÓN	32
3.4 DISEÑO DE SUB SISTEMA - MECÁNICO	34
3.4.1 ETAPA DE CALENTAMIENTO	40
3.4.2 ETAPA DE ENFRIAMIENTO	43
3.4.3 ETAPA DE AGITACIÓN	46
3.5 DISEÑO DEL SUB-SISTEMA ELÉCTRICO	47

3.5.1	TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	48
3.5.2	CIRCUITO DE ADAPTACIÓN PARA EL SENSOR DE TEMPERATURA	49
3.5.3	CIRCUITO DE CONTROL DE POTENCIA DE LA RESISTENCIA	53
3.5.4	CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN Y ACTIVACIÓN DE CELDAS PELTIER	58
3.5.5	CIRCUITO DE ACTIVACIÓN DE MOTOR DC PARA AGITACIÓN	62
3.5.6	CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN GENERAL	62
3.5.7	PROTECCIÓN	63
3.6	COSTOS	64
	CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y SOLUCIONES	69
4.1	PRUEBAS DE CIRCUITO DE ADAPTACIÓN PARA EL SENSOR DE TEMPERATURA	70
4.2	PRUEBAS DE CIRCUITO DE CRUCE POR CERO	75
4.3	PRUEBAS DE CIRCUITO DE ACTIVACIÓN Y ALIMENTACIÓN DE CELDAS PELTIER	77
	CONCLUSIONES	79
	RECOMENDACIONES	80
	BIBLIOGRAFIA	81



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MÓDULO DE ENFRIAMIENTO G.U.N.T EQUIPMENT [9]	10
FIGURA 2. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA EN UN TANQUE	12
FIGURA 3. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA CON ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE	14
FIGURA 4. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SUB SISTEMA MECÁNICO-ELÉCTRICO PROPUESTO	15
FIGURA 5. LAZO CERRADO DE CONTROL	17
FIGURA 6. TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	20
FIGURA 7. SENSOR DE TEMPERATURA LM335 – A LA DERECHA CAPUCHA DE SENSOR	22
FIGURA 8. RESISTENCIA ELÉCTRICA	23
FIGURA 9. CELDA PELTIER	24
FIGURA 10. DIAGRAMA P&ID, PARA MÁS DETALLES REVISAR PLANO P&ID DE ANEXO PLANOS	29
FIGURA 11. ESTRUCTURA COMPLETA DEL SISTEMA (MEDIDAS EN MM.)	35
FIGURA 12. ANÁLISIS DE ESFUERZO	37
FIGURA 13. SENSOR DE TEMPERATURA ENCAPSULADO	39
FIGURA 14. AGITADOR	46
FIGURA 15. DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA	48
FIGURA 16. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI-6009 USB	49
FIGURA 17. CIRCUITO MEDIDOR DE TEMPERATURA EN °C	50
FIGURA 18. AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN INA121P	51
FIGURA 19. RUIDO PRODUCIDO ENTRE 10KHZ Y 40KHZ	52
FIGURA 20. FILTRO DE SALIDA PARA SENSOR DE TEMPERATURA	53
FIGURA 21. CIRCUITO DE CRUCE POR ZERO	54
FIGURA 22. RESULTADO DE CIRCUITO DE CRUCE POR ZERO – FIGURA GENERADA POR SIMULADOR YENKA ELECTRONICS	55
FIGURA 23. CIRCUITO DE ACTIVACIÓN DE RESISTENCIA ELÉCTRICA	55
FIGURA 24. PERIODOS DE DISPARO	56
FIGURA 25. ACTIVACIÓN POR INTERVALO DE PERIODOS	57
FIGURA 26. MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN PARA OBTENER UN VOLTAJE DC DE APROXIMADAMENTE 146V A LA SALIDA DE LA RECTIFICACIÓN	59
FIGURA 27. ONDA TRIFÁSICA RECTIFICADA- FIGURA GENERADA POR SIMULADOR YENKA ELECTRONICS	59
FIGURA 28. TIEMPO ENTRE VOLTAJES PICO- FIGURA GENERADA POR SIMULADOR YENKA ELECTRONICS	60
FIGURA 29. CELDAS PELTIER UBICADAS EN SERIE- FIGURA GENERADA POR SIMULADOR YENKA ELECTRONICS	61

FIGURA 30. DAQ Y TARJETA DE ACTIVACIÓN DE RESISTENCIA Y PELTIER	69
FIGURA 31. CIRCUITO MEDIDOR DE TEMPERATURA EN °C	69
FIGURA 32. BAÑO TÉRMICO Y SENSOR SUMERGIBLE	69
FIGURA 33. INTERIOR DE BAÑO TÉRMICO	69
FIGURA 34. MEDICIÓN A 23°C	70
FIGURA 35. MEDICIÓN A 60°C	70
FIGURA 36. MEDICIÓN A 23°C	70
FIGURA 37. MEDICIÓN A 60°C	70
FIGURA 38. AUTOESCALADO	71
FIGURA 39. RANGO AMPLIADO	71
FIGURA 40. AUTOESCALADO	71
FIGURA 41. RANGO AMPLIADO	71
FIGURA 42. AUTOESCALADO	71
FIGURA 43. RANGO AMPLIADO	71
FIGURA 44. AUTOESCALADO	72
FIGURA 45. RANGO AMPLIADO	72
FIGURA 46. AUTOESCALADO	72
FIGURA 47. RANGO AMPLIADO	72
FIGURA 48. COMPARACIÓN DE VALORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS OBTENIDOS EN LABVIEW	73
FIGURA 49. SIMULACIÓN DE CIRCUITO DE CRUCE POR CERO	75
FIGURA 50. PRUEBA EN OSCILOSCOPIO DEL CIRCUITO DE CRUCE POR CERO FRECUENCIA = 59.52HZ	76
FIGURA 51. PRUEBA DEL CIRCUITO CON DAQ Y LABVIEW	76
FIGURA 52. CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN PARA CELDAS PELTIER	77

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN	65
ECUACIÓN 2. RESISTENCIA TÉRMICA	65
ECUACIÓN 3. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN	16
ECUACIÓN 4. TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN	16
ECUACIÓN 5. CRITERIO PARA PAREDES DELGADAS	31
ECUACIÓN 6. SOLVENTES PARA ACRÍLICO	33
ECUACIÓN 7. TRANSFERENCIA DE CALOR	34
ECUACIÓN 8. COEFICIENTE CONVECTIVO	35
ECUACIÓN 9. CALOR PERDIDO EN ÁREA LATERAL	37
ECUACIÓN 10. CALOR PERDIDO EN ÁREA LATERAL Y BASE	37
ECUACIÓN 11. CALOR TOTAL PERDIDO	38
ECUACIÓN 12. POTENCIA ÚTIL EN MOTOR DE AGITADOR	42
ECUACIÓN 13. TORQUE DE AGITADOR	42
ECUACIÓN 14. VOLTAJE DE SALIDA DE INTEGRADO INA121P	46
ECUACIÓN 15. RESISTENCIA DE AMPLIFICACIÓN	46
ECUACIÓN 16. RESISTENCIA DE TRIAC	50
ECUACIÓN 17. POTENCIA PARA ÁNGULO DE DISPARO	51
ECUACIÓN 18. VOLTAJE EN LÍNEA DE ONDA TRIFÁSICA RECTIFICADA	53
ECUACIÓN 19. VOLTAJE RIZADO DE ONDA TRIFÁSICA RECTIFICADA	54
ECUACIÓN 20. VOLTAJE CONTINUO DE ONDA TRIFÁSICA RECTIFICADA	54
ECUACIÓN 21. VOLTAJE ALTERNO DE ONDA TRIFÁSICA RECTIFICADA	54
ECUACIÓN 22. FACTOR FR DE ONDA TRIFÁSICA RECTIFICADA	54
ECUACIÓN 23. CONDENSADOR FILTRO DE ONDA TRIFÁSICA RECTIFICADA	54
ECUACIÓN 24. POTENCIA REQUERIDA DE MOTOR DE AGITADOR	55
ECUACIÓN 25. ENERGIA CONSUMIDA EN LA ETAPA DE CALENTAMIENTO	62
ECUACIÓN 26. EFICIENCIA ENERGÉTICA	62
ECUACIÓN 27. CMRR	69

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. COSTOS SUBSISTEMA MECÁNICO	65
TABLA 2. COSTOS SUBSISTEMA ELÉCTRICO	66
TABLA 3. COSTOS MANO DE OBRA PARA CONSTRUCCIÓN	66
TABLA 4. COSTO DE DISEÑO	67
TABLA 5. COSTOS TOTAL	67
TABLA 6. RESULTADOS DE DE VALORES EN CIRCUITO Y SOFTWARE	73
TABLA 7. ERRORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS	73
TABLA 8. GANANCIA EN INA121P Y OFFSET	74



SIGLAS

VDC : Voltaje De Corriente Directa.

VAC : Voltaje De Corriente Alterna.

PLC : Programmable Logic Controller.

PDI : Proporcional, Derivativo E Integrativo.

P&ID : Piping And Instrumentation Diagram.

PC : Personal Computer.

PVC : Polyvinyl Chloride.

DAQ : Data Adquisition.



ABREVIATURAS

°C. : Grados Centígrados.

°K. : Grados Kelvin.

uA. : Microampere.

mA. : Miliampere.

A. : Ampere.

mV. : Milivoltio.

V. : Voltaje.

h. : Hora.

min. : Minuto.

s. : Segundo.

ms. : Milisegundo.

L. : Litro.

m. : Metro.

cm. : Centímetro.

mm. : Milímetro.

W. : Watts.

Hz. : Hertz.

HP : Horse Power.

g. : Gramo.

Kg. : Kilogramo.

cc. : Centímetro Cúbico.

atm. : Atmósfera.

Cal.: Calorías.

KCal.: Kilocalorías.

J. : Joules.

Kj. : Kilojoules.

N. : Newton.

Pa. : Pascal.

CFM : Cubic Feet Per Minute.

Ω : Ohm.

dB.: Decibelios.

uF. : Microfaradios.

Φ . : Diámetro.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el desarrollo de nuevas tecnologías en el campo de la enseñanza educativa de la ingeniería de control ha dado un salto exponencial en su crecimiento y mejora, tal es así que en la actualidad existen empresas que ofertan equipos de automatización a medida respecto a la cantidad de procesos o requerimientos que la institución educativa solicite. Es también importante resaltar que el mercado de desarrollo tecnológico incide en la aplicación de nuevas técnicas y materiales para la experimentación, puesto que el avance científico y aplicativo debe ir en conjunto.

La demanda por encontrar nuevas soluciones a problemas comunes de parámetros de manejo en tiempo real como son el tiempo de establecimiento, el error en estado estable y el máximo sobre-impulso al iniciar el proceso, hace que las industrias soliciten personal experto en el rubro control de procesos para diseñar sistemas complejos que cubran la necesidad de la industria. Este conocimiento solo es adquirido en centros de enseñanza especializada como las universidades e instituciones técnicas que cuentan con los módulos más modernos de entrenamiento de control de procesos.

Un caso particular es el control de temperatura de un tanque de agua, donde comúnmente para enfriar la sustancia se usa intercambiadores de calor con circulación de líquidos refrigerantes. Este método, si bien es efectivo, también es costoso y ocupa un amplio volumen; sin embargo, con el desarrollo de nuevas tecnologías térmicas de semiconductores se logra transferir calor a menor costo y con un volumen reducido dentro del sistema, valiéndose a su vez, de un adecuado dispositivo de control digital que reduzca el índice de problemas en los parámetros de tiempo real.

Por lo tanto, la presente tesis muestra el diseño del prototipo mecánico – eléctrico de un módulo de control de temperatura para un tanque de líquidos. Se presentan, además, las distintas tecnologías de dispositivos de control que hay en la actualidad, así como también las ventajas físicas de diversos actuadores de temperatura presentes en el mercado. Adicionalmente, se pretende que el prototipo sirva de base para futuros acondicionamientos de control sobre otras variables físicas como caudal, presión y conductividad.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE DE LOS MÓDULOS EDUCATIVOS PARA SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA

1.1 MÓDULOS DE SISTEMAS DE CONTROL

En el actual sistema de enseñanza de las más prestigiosas instituciones educativas del mundo dedicadas al fomento de la ciencia y el desarrollo tecnológico, se tiende a incrementar la competitividad de sus alumnos y fomentar la aplicación del conocimiento teórico a situaciones y hechos reales, por lo que desde hace aproximadamente 20 años, numerosas empresas vienen desarrollando sistemas de entrenamiento o módulos educativos de simulación de situaciones reales con las que el alumno logra interactuar e impulsar su creatividad para resolver problemas [25].

Existen una amplia gama de módulos de entrenamiento en el mercado internacional, entre los cuales quienes más se destacan son los que pertenecen a la familia de “Módulos de control de procesos” [6]. En la *figura 1* se muestra un módulo de control de temperatura, el cual cuenta con las especificaciones y funcionalidades ideales para realizar una lógica sobre este proceso.

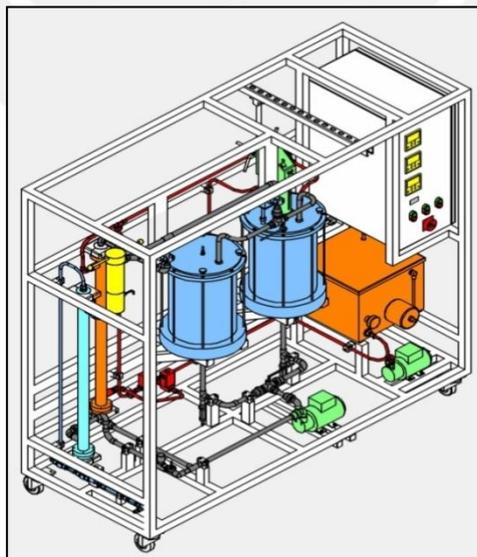


Figura 1. Módulo de Enfriamiento G.U.N.T Equipment

Fuente: revisar [9].

En este capítulo se mostrará el alcance tecnológico de los módulos que se ofrecen en el mercado, en especial se tratará de los módulos de control de temperatura, los cuales forman parte de la familia de control de procesos. En tal sentido, iniciara presentando modelos que abarcan múltiples funciones, posteriormente, se mostrará modelos independientes de acuerdo a sus funciones y parámetros requeridos.

Finalmente, se demostrará que la adecuada elección de dispositivos de control, sensores, actuadores y un diseño parametrizado del sistema, permitirá obtener resultados eficientes y acordes con los niveles de calidad mundial impuestos por los estándares tecnológicos de la industria.

1.2 TECNOLOGÍAS APLICADAS EN SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA

Los módulos educativos para el control de procesos son sistemas de simulación del control de variables físicas (temperatura, presión, nivel, caudal, PH., etc.) diseñados con el fin de proveer conocimientos a los alumnos acerca de situaciones reales que suceden en la industria, de manera que se puedan desenvolver con mayor facilidad en la elaboración de sistemas de control que requiera la empresa donde labora.

En el mercado comúnmente, existen módulos de procesos integrados, como por ejemplo: procesos de pasteurización, refrigeración de aceites, refrigeración de lubricantes, sistemas de aire acondicionado, equipos de transferencia de calor, control de velocidad de motores AC y DC, control de proceso industrial, control de posicionamiento de piezas, equipos de oleo-hidráulica y neumática, medida de variables eléctricas, equipos de calibración de instrumentos, procesos de tratamiento de agua, destilación y plantas de fermentación, entre otros [9][10]. En esta investigación, se analizará el proceso de control de temperatura de un tanque de líquidos el cual también forma parte de otros sistemas de mayor complejidad.

Actualmente, se usan técnicas muy conocidas para realizar el intercambio de calor tanto de líquidos como de gases en el entorno industrial, a partir de los cuales muchas empresas que elaboran los módulos adaptaron el modelo y los plasmaron dimensionalmente en sus equipos de entrenamiento [9]. Un esquema que es muy usado es el de la *figura 2*, en el cual se emplea como suministro de calor a una entrada de vapor regulada por una electroválvula, no tendrá contacto directo con la sustancia que

almacena el tanque ya que será conducida por una tubería en forma de serpentin que atravesará el tanque y luego del intercambio de calor, evacuará el condensado por su salida correspondiente.

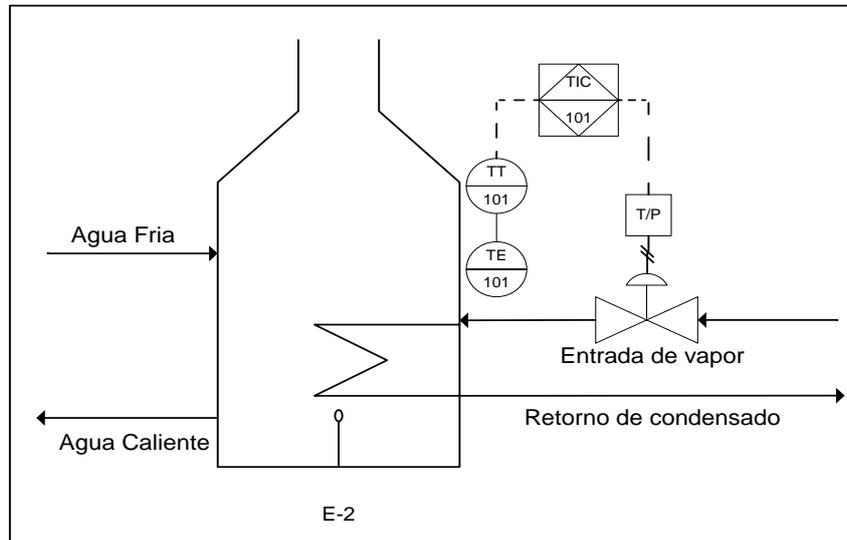


Figura 2. Sistema de Control de Temperatura en un tanque.

Por otro lado, la temperatura del tanque es constantemente sensada por un transmisor de temperatura (PT100, termocupla, termistor, etc.) el cual lleva la información mediante una señal eléctrica hacia el dispositivo de control, debido a que todo el proceso es un sistema retroalimentado, el dispositivo de control, luego de haber comparado con el valor deseado y procesado la información recibida (de acuerdo al método de control usado), envía la señal eléctrica correspondiente al transmisor de presión de modo que pueda operar la electroválvula y permita el paso del flujo de vapor; y de esta manera se concrete el lazo de control. A partir de este esquema se realizan muchas variantes en cuanto al manejo del sistema de control.

Con respecto al tipo de sensor usado, existe una amplia gama de dispositivos los cuales se usan dependiendo de la aplicación. Los termopares (o termo-cuplas) son usados y difundidos por la exactitud en la medida y bajo coste; sin embargo, el circuito de adaptación de señal presenta cierta complejidad debido a que no mantiene linealidad en la medición. Los sensores termoresistivos se caracterizan por trabajar en rangos lineales de operación los cuales van desde -80°C hasta 300°C , la variación de la resistividad del material será directamente proporcional a la temperatura a la cual se someta. Los termómetros bimetalicos y los termómetros por expansión de fluido son usados como indicadores en la zona donde son instalados, carecen de señal eléctrica [7].

Los actuadores como en el caso de la *figura 1*, son electroválvulas que son accionadas por solenoide para 2 estados (ON-OFF) o por apertura proporcional neumática, y también proporcional motorizada. Estas últimas, si bien son muy efectivas en un control PID, representan un alto costo, comparado con el de solenoide. De este modo se puede afirmar que existen también, dispositivos eléctricos elaborados con semiconductores que se valen del efecto Peltier para realizar la transferencia de calor.

Al respecto, las celdas Peltier son dispositivos constituidos por la unión de dos metales que al ser atravesada por una corriente operan como bombas de calor, por un lado absorben la energía calorífica y por el otro la expulsan. Asimismo, son muy económicas en comparación con un sistema de recirculación de vapor o de líquido refrigerante dentro de un tanque, puesto que se valen del aumento o disminución de la corriente para variar el flujo de calor transferido, a su vez realizan una transferencia de calor en la que la velocidad de enfriamiento depende del Q de bombeo de la celda usada, por esta razón se logran altas tasas de transferencia de calor dependiendo de la cantidad de celdas. Finalmente, cabe señalar que a pesar del desarrollo constante de estos dispositivos, su limitado tamaño aún impide que sea colocado en sistemas industriales, pero son muy útiles para el caso de módulos educativos [3].

Un dispositivo de control muy difundido en la industria es el Controlador Lógico Programable (PLC) [12], eléctricamente se caracteriza por ser robusto, maneja corrientes de control de 4-20mA (por norma industrial), algunos equipos se alimentan con 24 VDC, 120VAC y 220 VAC lo que lo hace adaptativo. Físicamente, son equipos modulares, de fácil instalación y mantenimiento. Internamente, cuenta con interfaces de entrada y salida las cuales interactúan con los sensores y actuadores del sistema a controlar. La parte principal de este equipo es el procesador, el cual maneja una ejecución secuencial de comandos, los cuales son almacenados en la memoria de programa, previamente son programados por medio de un software provisto por el fabricante; por ello existen ciertos equipos de PLC que pueden ser programados para el control de procesos continuo por PID, pero el costo de estos refleja las características adicionales con las que cuenta este dispositivo.

Finalmente, ciertas compañías optan por usar tarjetas de adquisición de datos [8], las cuales reciben señales analógicas o digitales de los sensores y/o transmisores, las convierten en un lenguaje digital entendible para el controlador que en este caso sería una computadora y mediante un software de control, poder procesar la información de planta. Esta información es enviada de vuelta hacia los actuadores de la planta por medio de la tarjeta de adquisición, completándose el lazo de control. La ventaja del control

digital ofrecido con este método es superior a un control continuo puesto que cubre las deficiencias respecto a velocidad de respuesta.

En la *figura 3*, observamos que este sistema de control se vale del flujo de combustible que le ingresa al quemador de un tanque para calentar el líquido. Si bien el incremento en la temperatura podría darse en tiempos cortos, también depende del poder calorífico del combustible y la cantidad usada para poder determinar la eficiencia de este sistema, en comparación con el sistema anterior (*figura 2*). Las resistencias termo-eléctricas son otra forma de proveer calor de manera rápida, no contaminante, de bajo costo y de poco mantenimiento, ya que solo hacen uso de la energía eléctrica para su operatividad.

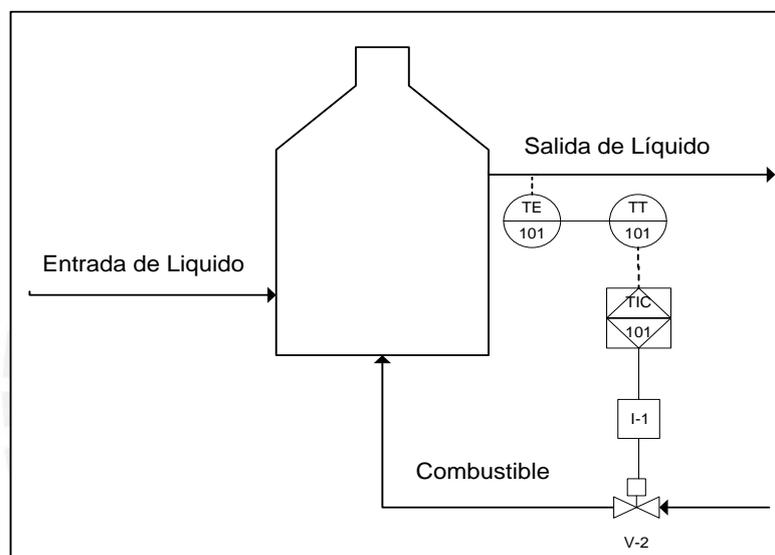


Figura 3. Sistema de Control de Temperatura con alimentación de Combustible.

Los sistemas de control digital por computadora son muy flexibles al momento de realizar lazos de control de innumerables variables (solo restringidos por el número de puertos con el que cuenta y la velocidad del procesador), gracias a esta característica los alumnos que usen el módulo podrán generar diversos algoritmos de control para el sistema [4].

1.3 MODELO TEÓRICO

El diseño del prototipo requiere tener conocimiento de las etapas que involucra la medición de la temperatura en el líquido o sustancia alojado dentro del tanque, también se debe tener en cuenta que se le puede adicionar una perturbación.

En la etapa de enfriamiento, se considerará el uso de celdas Peltier las cuales deberán contar con disipadores de calor y ventiladores que ayuden a evacuar la energía dispersada en el aire. De igual forma para la etapa de calentamiento se debe tener las consideraciones de potencia necesaria para alimentar a la resistencia termo-eléctrica, de esta manera se contará con un parámetro de regulación sobre el cual actuar.

Adicionalmente, se debe tener un perfecto conocimiento del funcionamiento de las entradas y salidas analógicas y digitales de la tarjeta de adquisición de datos para que de esta manera se pueda gestionar las señales de envío y recepción por el software de la PC.

Por último, se deben manejar nociones de cómo podrían implementarse los algoritmos de control para este sistema, con la finalidad de delimitar el diseño del hardware de control, otorgándole las herramientas precisas al programador; sin embargo, es importante indicar que la lógica de control y la programación no forma parte del alcance de este documento. La figura 4 describe lo anteriormente descrito.

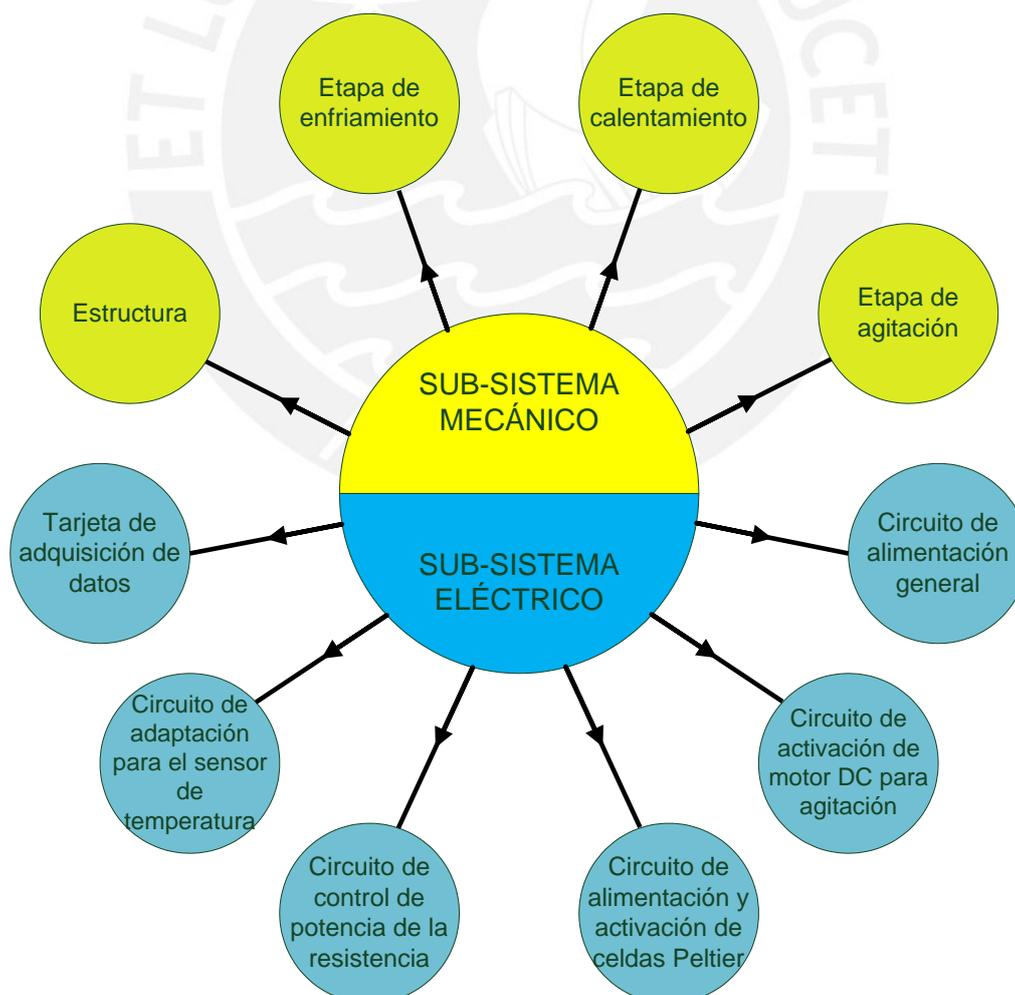


Figura 4. Diagrama de bloques del Sub Sistema Mecánico-Eléctrico propuesto.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL SUBSISTEMA MECÁNICO - ELÉCTRICO

2.1 HIPÓTESIS

2.1.1 HIPÓTESIS PRINCIPAL

Lo que se busca probar es que al realizar una adecuada investigación y plantear propuestos a los requerimientos para la construcción de un Sistema de Control, entonces obtendremos como resultado un sistema útil, efectivo y económico para la enseñanza práctica.

2.1.2 HIPÓTESIS SECUNDARIA

El planteamiento general del presente documento no solo busca probar lo propuesto en el párrafo anterior sino que también se procura diseñar de acuerdo a los siguientes postulados:

- Se escogerá dispositivos de control presentes en la industria nacional lo cual facilitará futuras acciones de mantenimiento del módulo.
- El desarrollo del módulo de control de temperatura se realizará en base al estudio del sistema de transferencia de calor por convección forzada y por conducción.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar el subsistema mecánico del sistema de Control de Temperatura de un tanque de agua.
- Diseñar el subsistema eléctrico del sistema de Control de Temperatura de un tanque de agua.

2.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los criterios de diseño de acuerdo a los Estándares de ingeniería y requerimientos planteados.
- Establecer valores de potencia provenientes de la resistencia eléctrica que permita al usuario trabajar en un rango de 25°C hasta 45°C. en un máximo de 15min.
- Determinar las características mínimas de los dispositivos involucrados en el proceso de enfriamiento que puedan trabajar con una diferencia de temperatura de 15°C, en un máximo de 15min.
- Elegir el sensor de temperatura adecuado teniendo en cuenta el costo, la precisión y el rango de medición.
- Elegir el equipo de agitación en base a los requerimientos del sistema.
- Diseñar los circuitos de adaptación tanto para sensores y actuadores.
- Dimensionar las fuentes de alimentación para los diversos equipos del sistema.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

El enfoque de esta propuesta es dar a entender a los usuarios cómo se comporta la temperatura al ser una variable física controlada, por esta razón se plantea un sistema de control que cuente con los elementos básicos de un control en lazo cerrado, tal como se muestra en la figura 5, lo cual posibilita aplicar algoritmos de control basados en control PID y otras técnicas como control Fuzzy, control por redes neuronales, etc.

El lazo de control consta de lo siguiente:

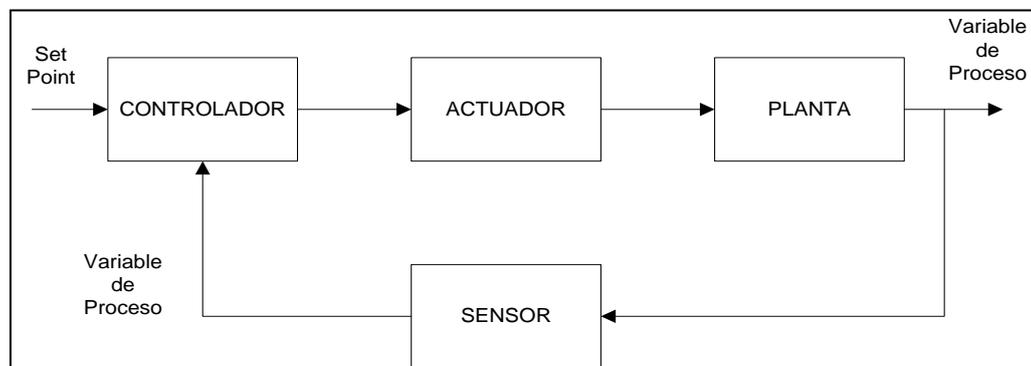


Figura 5. Lazo Cerrado de Control.

2.3.1 PLANTA

La planta es el entorno donde trabajara el sistema de control. Está compuesto por un tanque cilíndrico elaborado en base a acrílico el cual contendrá 20L de agua como volumen útil. El líquido ingresa de una toma de agua doméstica y se conduce hacia la entrada de una válvula manual ubicada en la parte lateral superior del recipiente, se acumula hasta una altura de 30cm. aproximadamente. Adicionalmente, hay un conducto de evacuación del líquido ubicado en la parte inferior del tanque con una válvula manual que controla el cierre o apertura.

En el interior del tanque se encuentran alojados: una resistencia eléctrica que sirve como actuador para elevar la temperatura del líquido; a su vez en la base del tanque se encuentra una placa de cobre que sirve de conductor térmico entre el líquido y el sistema de enfriamiento; adicionalmente, se instala un agitador para uniformizar su temperatura en el interior del tanque. Finalmente, se disponen los sensores de temperatura en distintas posiciones del interior del tanque.

2.3.2 VARIABLE DE PROCESO

El lazo de control depende de la variable que suministra información del estado de la planta, en este caso, la variable de proceso será la temperatura. Esta variable física describe la medida que se le otorga al desplazamiento del calor desde un cuerpo que contiene mayor energía hacia otro que conserva una menor cantidad. La transferencia de calor no solo determina la temperatura de los cuerpos, sino también predice la rapidez con la que se desplace la energía en ciertas circunstancias, algo que no logra la termodinámica cuando no se encuentra en equilibrio.

La transferencia de calor, tal como se indica en la figura 6, se puede clasificar de las siguientes maneras:

- **Transferencia por conducción:** es la forma de transferir calor de un cuerpo hacia otro por contacto directo, siempre y cuando exista una diferencia de temperaturas entre estos. [1]

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 1)}$$

Las características que aporta la transferencia por conducción sobre los cuerpos, básicamente son los parámetros de Conductividad Térmica (λ) y Resistencia Térmica (R_{th}). La primera describe la capacidad de permisividad que tiene un cuerpo en dejar pasar la energía en $1 m^3$ por $^{\circ}C$. Sus unidades son $1 \frac{W}{m^{\circ}C} = 0.86 \frac{kcal}{m^{\circ}C}$.

La segunda describe una propiedad inversa a la de la conductividad la que se interpreta como la incapacidad del cuerpo en dejar fluir energía a través de él, esta se relaciona directamente al espesor del cuerpo.

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

- R_{th} : Resistencia Térmica $\left(\frac{m^2 \cdot ^{\circ}C}{W}\right)$
 - e : Grosor del cuerpo (m)
 - λ : Conductividad térmica $\left(\frac{W}{m^{\circ}C}\right)$
- **Transferencia por convección:** es la forma de transferir la energía almacenada en un cuerpo a través de alguna sustancia como el agua o el aire hacia el medio externo. Existen dos tipos de transferencia por convección; la primera es Convección Natural que permite el paso de energía por medio de un flujo de aire o líquido de manera constante y laminar, la segunda, es la Convección Forzada que permite el paso de energía por influencia de factores que manipulan el flujo de la sustancia de transporte de energía. [1]

$$q = hA(T_p - T_{\infty}) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

- h : Coeficiente de Convección.
- A : Área de la superficie del cuerpo.
- $T_p - T_{\infty}$: Diferencia de temperatura con el medio externo.

- **Transferencia por radiación:** es el transporte de la energía emitida por un cuerpo mediante ondas electromagnéticas al medio externo o hacia otros cuerpos. [1]

$$q_{emitido} = \sigma AT^4 \dots\dots\dots (Ecuación 4)$$

Donde:

- σ : Constante de proporcionalidad.
- A : Área de la superficie del cuerpo.
- T : Temperatura del cuerpo.

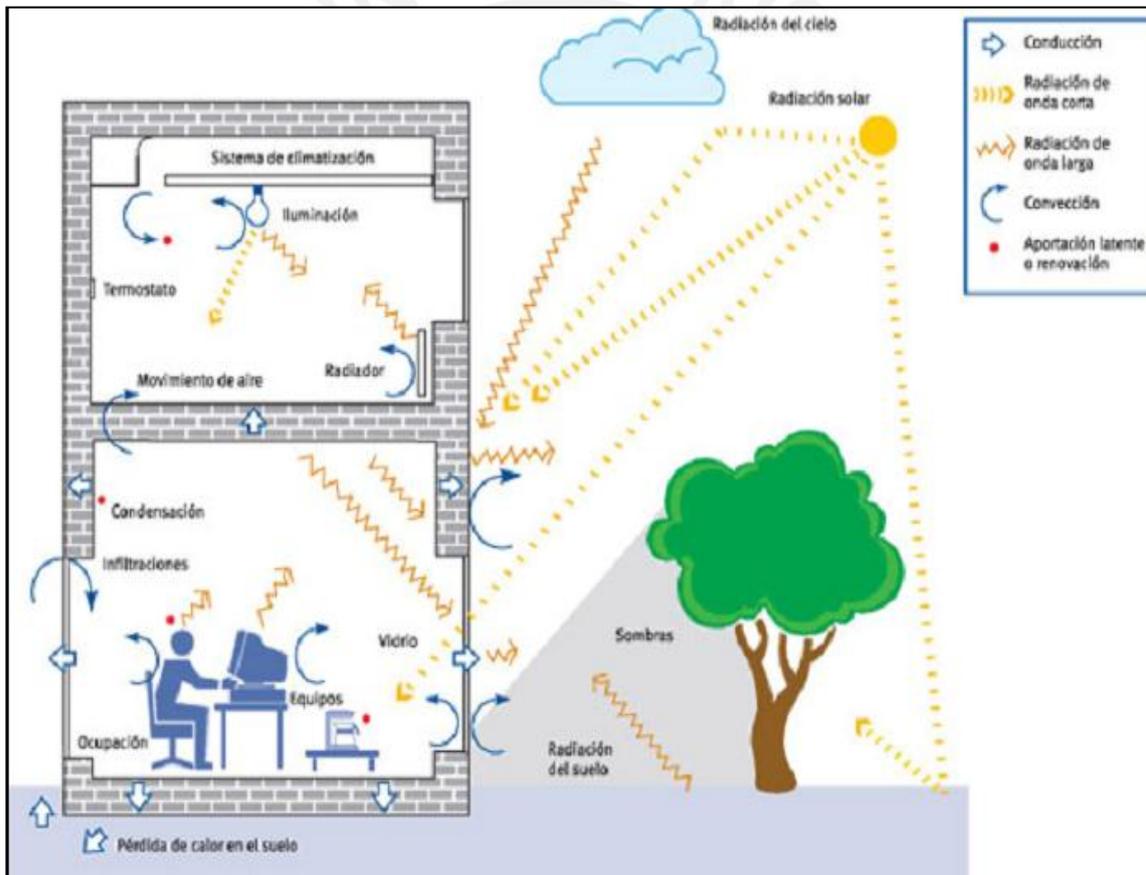


Figura 6. Tipos de Transferencia de Calor.

Fuente: revisar [1].

Básicamente, la variable de proceso se basará en el estudio de las dos primeras formas de transferencia de calor, conducción y convección; la transferencia por radiación emite una muy baja intensidad respecto a las dos anteriores, por lo que formaría parte de las pérdidas en el sistema.

2.3.3 SENSOR DE TEMPERATURA

El mercado de la industria nacional ofrece muchas alternativas en cuanto a sensibilidad, linealidad, precisión y costo. En los casos donde se requiere medir rangos de temperatura muy amplios (270°C a 3000°C), son muy usadas las termocuplas o termopares [2]. Estas funcionan bajo el efecto seebeck, que consiste en la circulación de corriente a través de la unión de dos metales de diferente composición los cuales son sometidos a distintas temperaturas (una fría y otra caliente). Tiene una mayor exactitud que cualquier otro sensor; sin embargo no presenta linealidad respecto a temperatura versus voltaje y necesita de protección para someterlo a medios que afecten a los metales que lo componen. [2]

Otros tipos de sensores de temperatura son los sensores de resistencia, que se basan en la variación del flujo de electrones a través de un embobinado de un tipo de metal conductor el cual esta encapsulado por un aislante y protegido por un revestimiento de vidrio o cerámica; por lo tanto se interpreta el cambio como una variación de resistencia eléctrica en el conductor. Su linealidad depende del tipo de material con el que se fabrican, y solo la mantienen hasta cierta temperatura. Es necesario tener un circuito de adaptación para recibir la señal enviada por el sensor, generalmente se construyen puentes Wheastone y además se debe contar con un circuito de Amplificación Instrumental, lo que incrementa su costo. [2]

Finalmente, encontramos a los sensores integrados de precisión, los que actúan como un diodo Zener que mantiene un voltaje de referencia dependiendo de la temperatura en la que se encuentre. Son de bajísimo costo en comparación con los otros sensores y se pueden calibrar fácilmente; sin embargo, si se desea sumergir en algún tipo de sustancia como el agua, es necesario construir un cobertor que lo mantenga aislado del líquido, así como se muestra en la *figura 7*, pero que a la vez transmita el calor del medio que lo rodea.

Es importante indicar que, el voltaje generado por el sensor de temperatura es del orden de los milivoltios y además reciben interferencia del medio que lo rodea, por lo que es conveniente usar un Amplificador de Instrumentación, y si es necesario, adicionar un filtro. Asimismo, en vista de que se necesita precisión en el instrumento para el rango de operación solicitado (25°C a 45°C) y también que sea de bajo costo, entonces se seleccionó al sensor integrado LM335 que genera un cambio de $10\text{mV}/^{\circ}\text{K}$ en su salida, también se construirá un cobertor para el integrado en base a cobre que es un excelente conductor del calor y tubo de PVC para proteger el cableado. [13]



Figura 7. A la izquierda Sensor de Temperatura Lm335, Fuente: revisar [13] – A la derecha Capucha de Sensor.

2.3.4 ACTUADORES

Como ya se ha identificado, se cuenta con tres tipos de actuadores:

2.3.4.1 ACTUADOR DE CALENTAMIENTO

La etapa de calentamiento lo determina una resistencia eléctrica de aproximadamente 2.2kW , muy parecido al que se muestra en la figura 8. Esta trabaja limitando el flujo de corriente por medio de su estructura interna y su composición, llevan el remanente en forma de calor hacia el exterior de modo que para este sistema, transporta ese calor hacia el líquido cercano a la superficie de la resistencia lo que agita las moléculas de agua al punto de repelerse unas con otras transmitiendo su energía calorífica hasta disiparse.

Generalmente, están elaboradas en base a cobre y acero inoxidable, dado que estos metales son buenos conductores térmicos y eléctricos, una desventaja es la corrosión y oxidación que puede generarse dependiendo del área donde se empleé, es por esto que las resistencias construidas en base a acero inoxidable mantienen un precio mucho más

elevado que las otras. Se pueden construir resistencias de diferentes formas y tamaños, esto depende de la potencia a usar y/o del lugar donde serán instalados.

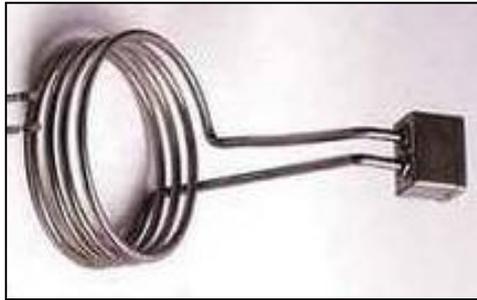


Figura 8. Resistencia Eléctrica

Fuente: revisar [20]

2.3.4.2 ACTUADOR DE ENFRIAMIENTO

En la etapa de enfriamiento se evaluó aplicar diferentes tipos de tecnología para enfriar como unidades de condensación, torres de enfriamiento, intercambiadores de calor mediante radiadores y las bombas de calor fabricadas en base a semiconductores.

Las unidades de condensación son equipos de refrigeración que cuentan con un compresor, evaporador, condensador y líquido refrigerante. Están integrados en un módulo compacto con una entrada y salida donde irá ubicado la pieza que realizará el intercambio de calor (serpentín de cobre), en su interior circulará el líquido refrigerante (gaseoso a presión) capaz de transportar el calor absorbido, transportarlo a la unidad, eliminarlo del sistema y su posterior recirculación. La desventaja que presenta es su altísimo costo y su gran volumen en la medida que se necesite eliminar un diferencial de temperatura muy alto en poco tiempo. [1]

Los intercambiadores de calor mediante radiadores, mantienen el mismo sistema de recirculación que los anteriores, la diferencia radica en la manera de extraer el calor por medio de un ventilador de aire y una estructura compuesta de aletas y tubos por donde circula el líquido refrigerante, y envía el calor hacia fuera del sistema por convección forzada. La desventaja de este sistema al igual que el anterior es la mínima temperatura que puede llegar es la del ambiente, además de ubicar el radiador en un espacio sin influencia de calor. . [1]

Por último, están las **bombas de calor** construidas en base a semiconductores. Las celdas Peltier son dispositivos considerados bombas de calor debido a que extraen por

un lado del dispositivo el calor y por el otro lo expulsan, esta forma de trabajo se basa en la estructura que compone este dispositivo. Internamente, poseen un arreglo de semiconductores dopados P-N (Pellets de Bismuto Teluro) los cuales llevan las cargas positiva y negativa respectivamente, con lo que transportan la mayor cantidad de corriente. Eléctricamente, los semiconductores que mencionados en el párrafo anterior están conectados en serie (térmicamente en paralelo), además están recubiertos por un substrato de cerámica metalizado, que actúa como plataforma para los pellets, y un cable conductor por el cual se alimenta de energía a las celdas.

Cuando una celda es sometida a un voltaje DC, la carga positiva – negativa sobre cada pellets hacen que de un lado de la celda se absorba el calor y lo expulse por el lado contrario. Por lo que la temperatura en la superficie por donde se extrajo el calor descende, mientras que el otro lado realiza el efecto contrario. Si se invierte la polaridad de la celda, ocurrirá el efecto inverso. La figura 9 representa lo que se acaba en este párrafo.

La elección de estas celdas se basa en la potencia a transferir por lo que a mayor calor transferido se podrá obtener mejores resultados en corto tiempo. Comercialmente, se distribuyen en tamaños pequeños que van desde 2mm x 2mm hasta 10mm x 10mm, para potencias menores a 300W de extracción por celda, por lo que para sistemas mayores es necesario tener una “n” cantidad de Peltier dispuestos en contacto directo con la superficie a enfriar. [14]

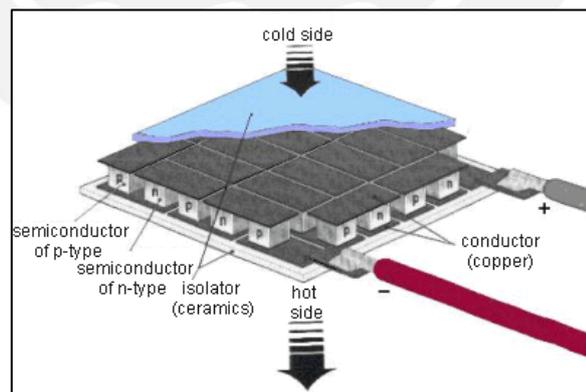


Figura 9. Celda Peltier

Fuente: revisar [14]

El precio en comparación con los demás métodos es relativamente bajo considerando que necesita de accesorios que ayuden a la disipación del calor (disipadores y ventiladores). Por ello, además que pueden llegar a temperaturas menores que la temperatura ambiente. Debido a sus diversas ventajas de operatividad, ensamblaje y precio, se escogió este sistema de enfriamiento como el ideal para ser usado en el presente sistema de control.

2.3.4.3 ACTUADOR DE AGITACIÓN

La etapa de agitación se planteó debido a que proporcionará una alternativa más de estudio para el usuario o programador, pues sin esta etapa el sistema interno de transferencia de calor se comportaría como un tipo de transferencia por conducción donde la resistencia eléctrica proporcionaría el calor hacia su entorno más cercano con la misma intensidad, caso contrario sucedería en las paredes del tanque en las que un menor flujo de calor y por ende, estaría a una temperatura menor.

Al estar activado el agitador desplaza el agua de manera circular como un flujo de corriente que recorre la base hasta llegar a la superficie, con lo que se logra una distribución uniforme de calor a través de todo el sistema, transferencia por convección forzada.

Con la finalidad de lograr un desplazamiento de la masa de agua, el agitador se basa en las paletas helicoidales ubicadas cerca a la base del recipiente, la que a su vez, está unida a un eje que le brinda la transmisión de movimiento por medio de un motor que genera el torque suficiente para el desplazamiento del líquido y logre romper la inercia inicial. [15]

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SUBSISTEMA MECÁNICO Y ELÉCTRICO

3.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo expone las soluciones que se aplicarán para diseñar el sistema de control de temperatura en base a los criterios de diseño y requerimientos propuestos para la fabricación de este módulo.

La primera parte de este capítulo se planteará los criterios de diseño para cada área de ingeniería involucrada en la composición del sistema; la segunda, expondrá las propuestas de solución en base a cálculos y diagramas que demuestren de manera metodológica y fehaciente el mejor resultado; y finalmente, se evaluarán los costos de adquisición de equipos e instrumentos, de construcción, mano de obra y puesta en marcha de modo que se pueda realizar un análisis de factibilidad respecto a otras tecnologías que cumplen objetivos similares.

3.2 CONDICIONES DE SITIO

El sistema será instalado en un laboratorio que cumpla como mínimo con las siguientes normas y estándares para Laboratorios de Investigación Académica, tales como:

- 29 CFR 1910.1450: OSHA - Occupational Exposures to Hazardous Chemicals in Laboratories
- ANSI/AIHA - American National Standard Z9.5 for Laboratory Ventilation
- ASHRAE 110 - Method of Testing Performance of Laboratory Fume Hoods
- ASHRAE - Laboratory Design Guide
- Department of Veterans Affairs - Research Laboratory Design Guide
- ISEA Z358.1 - Emergency Eyewash and Shower Equipment
- National Institutes of Health - NIH Design Policy and Guidelines
- National Institutes of Health (NIH) - Guidelines for the Laboratory Use of Chemical Carcinogens, Pub. No. 81-2385
- NFPA 30 - Flammable and Combustible Liquids Code

- NFPA 45 - Fire Protection for Laboratories using Chemical

El ambiente debe contar con las siguientes condiciones de temperatura y humedad:

- Temperatura Máxima: 25 ° C
- Temperatura Promedio: 21° C
- Temperatura Mínima: 18 ° C
- Humedad Relativa Máxima: 10 %

3.3 CRITERIOS DE DISEÑO

El sistema se divide en 5 áreas de desarrollo de ingeniería, las cuales componen los subsistemas mecánicos y eléctricos, las cuales son las siguientes:

3.3.1 PROCESOS

El sistema deberá contar con una etapa de recirculación de líquido de proceso y de control de temperatura. En la primera será necesario contar con dos reservorios, uno para almacenar el líquido y poder reusarlo y otro como parte del proceso de transferencia de calor. El líquido del primer recipiente pasará hacia el segundo, para esto será necesario contar con una bomba y válvulas manuales de cierre instaladas a lo largo de la tubería que conecta los recipientes, y viceversa.

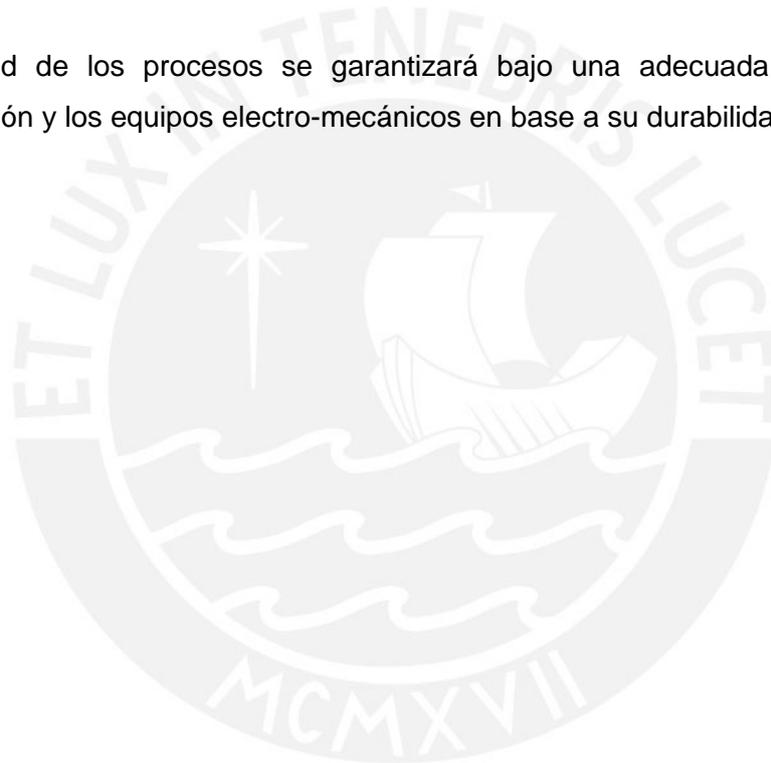
Una vez culminado el proceso de transferencia de calor, se procederá a devolver el líquido usado hacia el tanque de reserva con solo abrir una válvula manual ubicada en la tubería de retorno. Adicionalmente, se contará con un control de nivel local con enclavamiento respecto a la bomba, de manera que una vez llenado el segundo reservorio hasta los 20L requeridos, la bomba procederá a apagarse.

En la segunda etapa, la temperatura será la variable del proceso, esta operará en un rango de 25°C hasta 45°C con una tolerancia máxima de $\pm 1/2^\circ\text{C}$ (de acuerdo a los requerimientos mínimos de tecnologías similares). Con la finalidad de ayudar a la homogenización de la temperatura en el recipiente de proceso, se contará con un agitador helicoidal, el cual se activará cuando se inicie el proceso de transferencia de calor.

El líquido será sometido al calor mediante una fuente calorífica la cual estará en contacto directo con el líquido contenido en el reservorio. De la misma manera para bajar la temperatura será necesario colocar un equipo que absorba el calor del líquido. El rango de trabajo para la elevación de temperatura será desde 25°C hasta 45°C y no deberá exceder los 15min.

Asimismo, para el descenso de temperatura se recorrerá desde 45°C hasta 25°C sin exceder 15min, tiempo que es establecido de acuerdo a los requerimientos que comparten los módulos de control de temperatura ofrecidos en el mercado. El proceso completo se puede apreciar en la figura 10 donde se muestra el Diagrama de tuberías (P&ID).

La efectividad de los procesos se garantizará bajo una adecuada selección de la instrumentación y los equipos electro-mecánicos en base a su durabilidad y bajo costo.



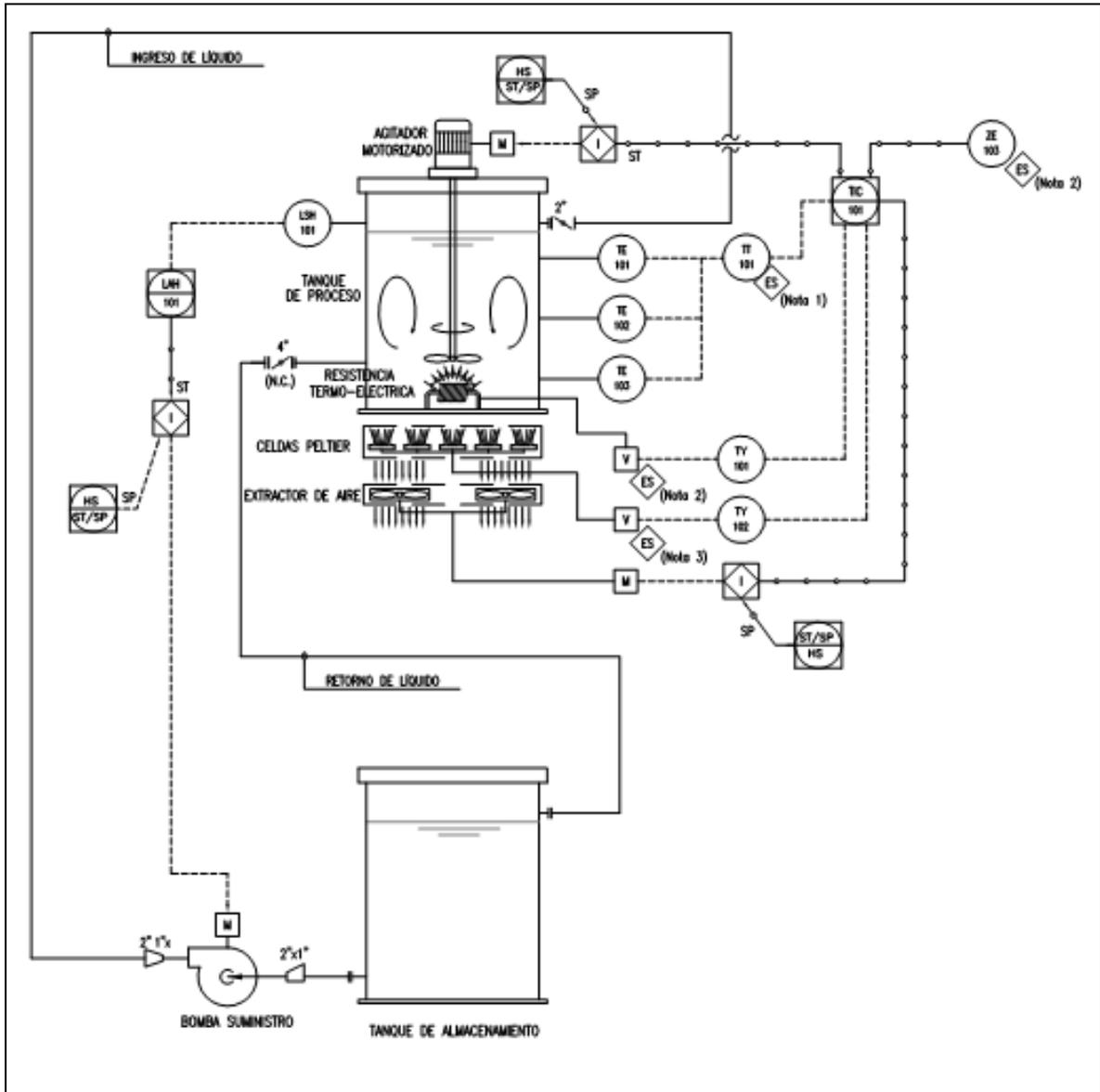


Figura 10. Diagrama P&ID, para más detalles revisar plano P&ID de anexo Planos

3.3.2 MECÁNICA

La selección de los equipos se realizará, de acuerdo a las consideraciones de proceso, específicamente, la capacidad de cada pieza de equipo de alcanzar los objetivos de diseño, tanto en términos de eficiencia como de funcionamiento. Otras consideraciones:

- Bajo costo de capital y mantención.
- Bajo costo de operación.
- Seguridad.
- Repuestos que se puedan conseguir rápidamente con representantes nacionales.

Los equipos se diseñaran de modo que puedan ser desmontados fácilmente para su mantenimiento y lubricación, con el objetivo de poder operar dentro del medio ambiente del laboratorio. A su vez, se tomará en cuenta la altura, las temperaturas ambiente y la corrosividad de la atmósfera del laboratorio.

El módulo funcionará aproximadamente 27 veces durante los 365 días del año, teniendo en cuenta que se usará en cursos de Control y Automatización y adicionalmente como caso de estudio de investigación. Se contemplarán resguardos para la protección del personal alrededor de todos los componentes móviles y expuestos, y de los componentes de alta temperatura sin aislamiento. Asimismo, será necesario realizar canales de drenaje para evitar que las filtraciones ocasionadas por el uso continuo puedan afectar al sistema eléctrico del montaje en las partes donde exista posibilidad de derrame.

Al realizar el análisis de selección de acoples es necesario considerar que estos puedan ser reemplazados con facilidad, además de evitar el efecto Backlash. Se usarán rodamientos de bolas con contacto directo para alinear ejes, los que deberán ser capaces de tomar el par continuo del motor suponiendo un agarrotamiento del impulsor. En caso se usara agitadores, las paletas deberán adecuarse al tipo de flujo de agua que se desea, no debe sobrepasar las 800 RPM para 25L de agua en tanque.

El diseño contemplará evitar un contacto directo entre los cables eléctricos y los equipos que alojen líquidos. Los tanques deberán cumplir con los estándares de ASTM D4802, para ello el proveedor deberá otorgar el certificado del material.

3.3.3 ESTRUCTURA

Las soldaduras de las piezas metálicas se deberán realizar de preferencia en posición plana, mediante método convencional de soldadura por electrodo, usando electrodos compatibles e iguales al metal base, de acuerdo con AWS E-50; además deberán ser suaves y regulares, sólidas y homogéneas en toda la superficie, y libres de porosidad, escoria, incrustaciones y otros defectos.

Es necesario comprobar la fabricación y soldadura no destructiva de acuerdo a las siguientes normas:

- Placas y perfiles de acero al carbono: ASTM A36
- Pernos de acero al carbono: ASTM A325, Tipo 1; A307, Gr B
- Tuercas de acero al carbono: ASTM A194, Gr 2H; A563, Tipo D

Los materiales deben ser nuevos, estar derechos y libres de torceduras y dobleces. Los cantos vivos expuestos deberán ser pulidos.

Las superficies de acero al carbono deben ser preparadas y revestidas con el sistema de pintura especificado de acuerdo con las especificaciones de revestimiento de protección del proyecto. Asimismo, todas las superficies de acero al carbono que normalmente no se pintan deben ir revestidas con un compuesto anticorrosivo adecuado.

El corte y cizallamiento de las placas debe efectuarse de manera limpia y exacta. El segundo procedimiento se limitará solo para acero de 2,5 mm (1/10 pulgada) y de menor espesor, si el espesor del acero es superior a 2,5 mm (1/10 pulgada) deberá cortarse con llama de gas de modo que los bordes queden suaves y lisos. Los cortes con llama de gas se deberán realizar con un soplete mecánico siempre que sea posible.

Los materiales deben ser enderezados por un medio que no dañe los mismos y si en caso necesitan ser doblados se tomará en cuenta hacerlos con procedimientos en frío, para esto se debe considerar que el radio mínimo deberá ser 1,5 veces mayor al espesor del material.

Los elementos completos deben estar rectos y libres de torceduras, dobleces y juntas abiertas. La variación máxima de la posición detallada de las líneas centrales de los agujeros para la conexión de elementos estructurales deberá ser 1,6 mm (1/16 pulgada), y 0,8 mm (1/32 pulgada) con respecto a la posición real de las mismas.

3.3.4 ELÉCTRICA

Las cajas de conexión de equipos deberán tener un grado de protección Nema 4. Así también los niveles de tensión no deben exceder los 360VAC. @ 60Hz (Estrella con neutro a tierra). Por otro lado, para el caso de tensión continua como máximo se contará con 12VDC. Las tensiones de alimentación sobre la electrobomba no excederá los 220VAC con una potencia menor a ½ HP, y a su vez esta última debe contar con protección Nema 4.

Todas las conexiones eléctricas deben estar protegidas y conducidas por tubos de PVC flexibles para evitar contacto con superficies mojadas y evitar su degradación, cada punto de conexión debe ser reflejado a una bornera de manera que se evite la sobre manipulación de los puntos de conexión pertenecientes a las tarjetas y equipos. Los puntos de conexión deben estar protegidos por dispositivos de protección eléctrica como fusibles. Es necesario colocar breakers (llaves electromagnéticas) para poder alimentar a los equipos y a las tarjetas de alimentación.

Todos los equipos deberán contar con un cable para protección a tierra el cual se centralizará en una de las cajas de conexiones, a partir de esta se estipulará un tipo de cable y los accesorios necesarios para conducirlos a su puesta a tierra. Del mismo modo, para las tarjetas de instrumentación, se deberá contar con otro cable y accesorios para su recorrido hacia otro punto con conexión a tierra.

De acuerdo a la descripción anterior, será necesario considerar un pozo a tierra de 10ohms para los equipos y otro de 5ohms para los instrumentos, los cuales son recomendados según la norma de electricidad peruana, estos a su vez se integrarán a la malla de tierra del ambiente.

3.3.5 INSTRUMENTACIÓN

El sistema de control y la instrumentación serán diseñados para proporcionar la información y el control necesarios para operar la planta de manera eficiente y con seguridad.

Los tanques de agua serán monitoreados por alarmas de nivel alto y bajo, según corresponda, de esta manera se logrará mantener un nivel de agua fijo en el tanque de

proceso. La activación de la bomba y del agitador será manual y de manera remota desde el software de supervisión y control con el que deberá contar el sistema.

Las válvulas usadas son manuales, de manera que si en adelante se desea modificar la funcionalidad de estas, pueden ser reemplazadas por válvulas controladas por señales analógicas de 4-20mA.

El P&ID refleja la ubicación y disposición de los instrumentos en la planta, por lo tanto se deberá respetar el orden propuesto al momento de instalar los equipos.

El software estipulado para el control deberá ser comercial y del tipo educativo debido al público al cual va dirigido el módulo de control. Este de ser instalado en una PC que soporte los requerimientos mínimos del software escogido.

Los transmisores serán normalmente colocados dentro de una caja con protección NEMA 4. Los transmisores usados deberán ser de bajo costo, dependiendo del rango de trabajo de la planta, se estipulará usar una proporción lineal entre el valor de voltaje a la salida del transmisor con el valor de temperatura.

La energía 220VAC @ 60Hz provista deber ser protegida por fusibles o interruptores que sean necesarios. Adicionalmente se debe considerar esta protección para la fuente de 12 VDC.

Los siguientes niveles de transmisión de señal serán mostrados:

- Señal analógica: 0-10VDC ó 4-20mA.
- Señales de estado: 5VDC.
- Control ON/OFF: 5VDC.

No es necesario contar con una interfaz capaz de manejar capacidades de transmisión mayores a 50Kmuestras/s, debido a que la temperatura es una variable lenta en cuanto a su cambio de parámetros.

Por motivos de modularidad, versatilidad y costo se estipula colocar un módulo de entradas y salidas con conexión a una PC. De esta manera el módulo aceptará las distintas propuestas de algoritmos de control que se le propongan mediante software.

Todo el cableado de señales será diseñado con 3 o 5 cables torcidos de 100% de blindaje electrostático de aluminio mylar, un alambre desnudo de dren y una chaqueta de

PVC. Los conductores serán de # 16 como mínimo, alambres de cobre trenzados. El aislamiento será clasificado para 300V y 90°C como mínimo. El cable será retardante del fuego, químicos y a la luz del sol.

3.4 DISEÑO DE SUB SISTEMA - MECÁNICO

De acuerdo a los requerimientos de diseño propuestos y los criterios de diseño, se determinará la capacidad máxima con la que se establecerá el diseño del tanque, el material, las dimensiones y la disposición de los accesorios de instalación. La figura 11 nos muestra el diseño del prototipo elaborado en base a las especificaciones y criterios mencionados anteriormente.

Se consideró trabajar con una carga útil máxima de 20 L de sustancia líquida, que para el presente caso será agua. Este líquido presenta las siguientes características [16]:

- Estados: Sólido (hielo) / Líquido / Gaseoso (vapor)
- Color: incolora
- Sabor: insípida
- Olor: inodora
- Densidad: 1g/cc a 4°C
- Punto de congelación: 0°C
- Punto de ebullición: 100°C
- Presión crítica: 217,5 atm
- Temperatura crítica: 374°C

Con la finalidad de contener el aproximado de 20L de agua es necesario contar con un tanque el cual posea un volumen máximo de 35L, se propone tal cantidad debido a que existe una proyección para adicionar más instrumentos de medición de variables de proceso como nivel, presión, ph, etc. Por lo tanto, se propone la construcción de un tanque con las siguientes dimensiones:

- Altura $H = 500\text{mm}$
- Diámetro $D = 300\text{mm}$
- Espesor = 6.5mm

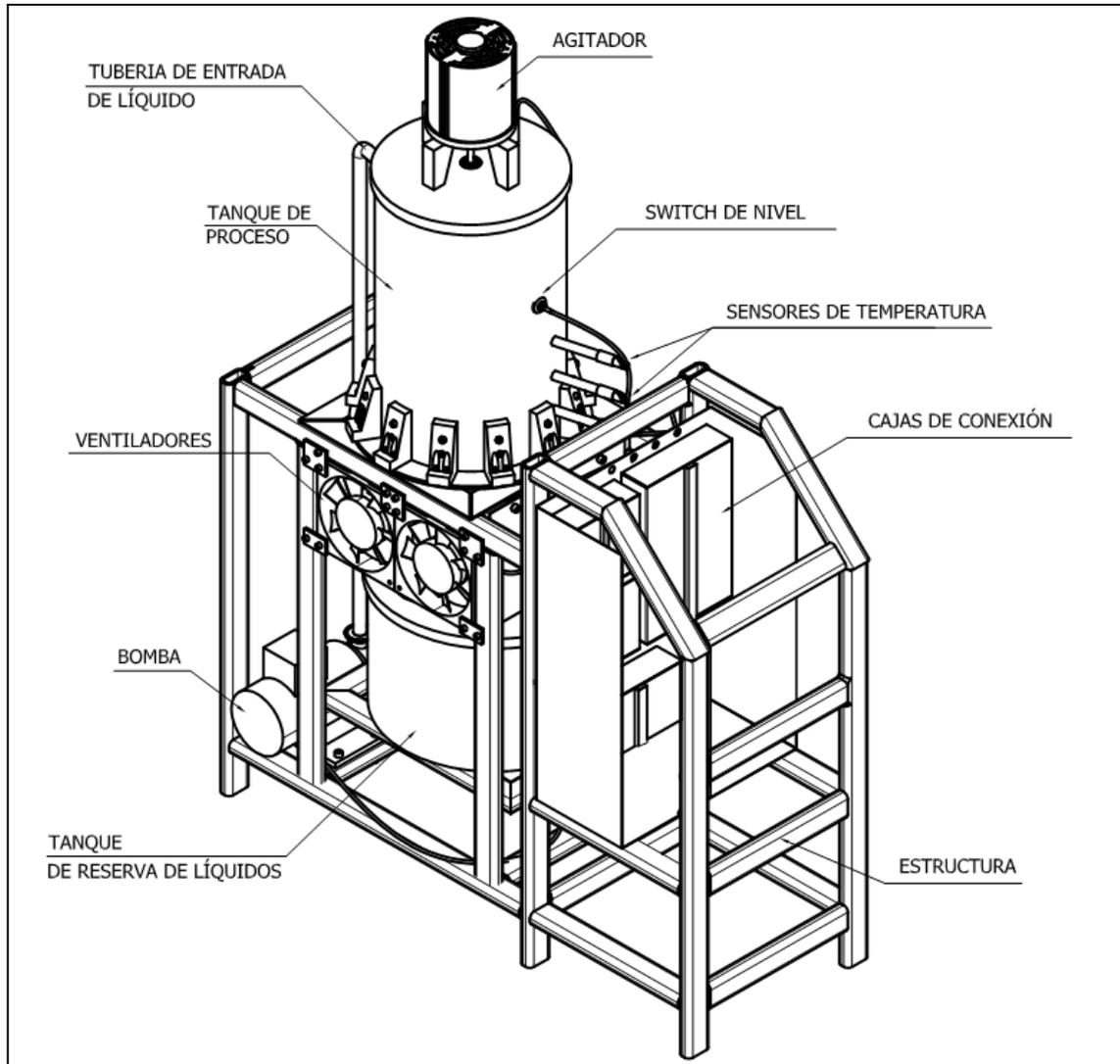


Figura 11. Estructura Completa del Sistema

El tanque debe contar con aislamiento térmico, por lo que se propone usar como material al acrílico, ya que posee una conductividad térmica de $5 \times \frac{10^{-4} \text{ cal}}{\text{cm}^\circ \text{Cs}}$ (ó $0.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ \text{C}}$), según Norma ASTM D-177, lo que es 3,77 veces menor que la del vidrio, por tanto lo convierte en un aislante térmico idóneo para esta aplicación, de esta manera se evitará pérdidas excesivas de calor que puedan influir en el proceso estudiado. Otra característica a resaltar es que la temperatura máxima en la que la lámina de acrílico mantiene su forma es 80°C , esto significa que no existirán problemas respecto a si el material se expande y deforma en un corto periodo de tiempo puesto que la máxima temperatura que se debe llegar en un proceso es 45°C , sin embargo, se sobredimensiona ciertas características dimensionales de los componentes con el fin de asegurar su correcto funcionamiento.

A continuación se muestra el **cálculo de la presión que soporta el tanque**, sabiendo que:

- $R = 0.15\text{m}$
- $H = 0.5\text{m}$
- Masa máxima = $35\text{Kg} \approx 35\text{L Agua}$

Entonces:

$$\text{Área lateral} = 2\pi RH = 2\pi \times 0.15\text{m} \times 0.5\text{m} = 0.47\text{m}^2$$

$$\text{Área Base} = \pi R^2 = \pi \times (0.15\text{m})^2 = 0.07\text{m}^2$$

$$\text{Área total} = \text{Área lateral} + \text{Área base} = 0.54\text{m}^2$$

Además,

$$\text{Fuerza} = \text{MasaMáx} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 35 \times 9.8 = 343\text{N}$$

Por lo tanto:

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área total}} = \frac{343\text{N}}{0.54\text{m}^2} = 635\text{Pa}$$

El valor de la presión que deberá soportar el tanque será 10% más de la calculada lo que da 700Pa considerando el volumen máximo, con este valor y por el criterio de diseño para Cilindros de Pared Delgada [17], se determinó el valor del espesor del tanque:

$$\frac{\text{Diámetro interno}}{\text{espesor}} > 40 \dots \dots \dots \text{(Ecuación 5)}$$

$$\frac{30\text{cm}}{.65\text{cm}} = 46.15 > 40$$

Debido a que en la base se instalará el sistema de enfriamiento por conducción, se propone ubicar una base delgada con características térmicas adecuadas para conducir calor, tal es el caso del cobre. Por tal motivo, se propone acoplar una placa de cobre con un diámetro de 0.3m y 1.5mm de espesor, para evitar filtraciones y mantener una base sólida se incorpora un sello de goma entre la base de cobre y la pared circular de acrílico. Adicionalmente, para mantener una repartición de esfuerzos de manera uniforme se propone colocar nervaduras entre la base del tanque y la pared externa, tal como se muestra en la *figura 13*.

El material de la placa será de cobre debido a que su coeficiente de conductividad térmica es de $9489 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^\circ\text{C}^\text{s}}$, lo cual lo convierte en un excelente conductor térmico. En este sentido, para comprobar el esfuerzo que debe soportar la base de cobre, se realizó un análisis de esfuerzo admisible, de acuerdo a la gráfica mostrada en *figura 12*, el mayor esfuerzo se da en el centro de la base, sin embargo la conexión entre la base y las nervaduras compensan el esfuerzo realizado y reparten la carga.

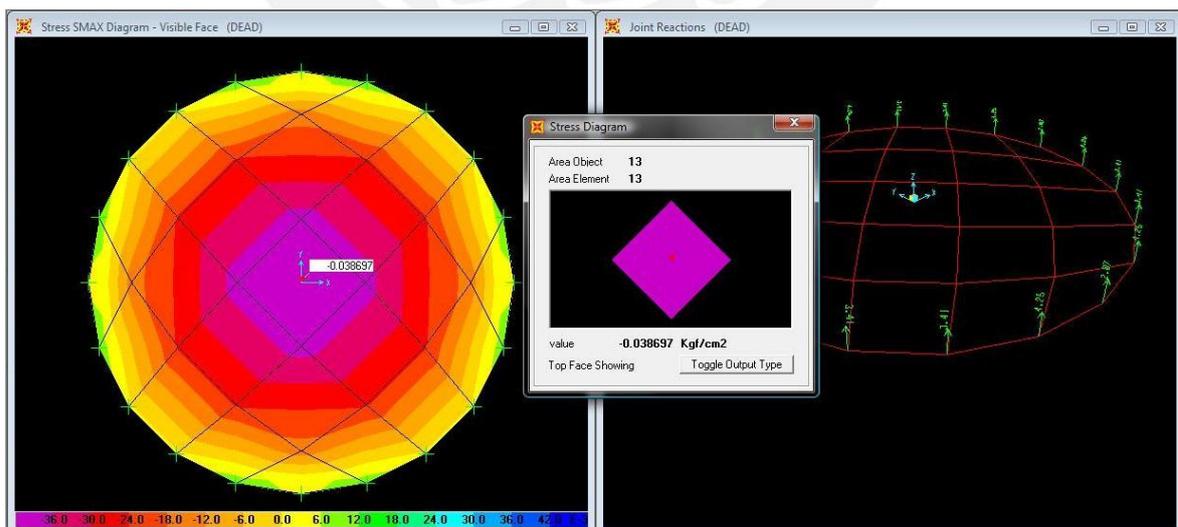


Figura 12. Análisis de esfuerzo

Finalmente, para la elaboración de este tanque es necesario reforzar las juntas de las paredes por lo que se usará un adhesivo adecuado. En este sentido, es oportuno indicar que en el mercado local existen distintas técnicas de pegado entre las cuales están:

- Curado de resina adhesiva sobre un sólido.
- Evaporación de un disolvente de un polímero plástico.
- Evaporación de agua de un látex polimérico.
- Enfriamiento de un polímero.

De acuerdo a los criterios de diseño planteados, se eligió la técnica de curado de resina adhesiva sobre un sólido, la cual consiste en aplicar un polímero disuelto en un monómero. La adición de un peróxido hará que el monómero y el polímero completen la polimerización y subsecuentemente el pegado.

El pegamento formará parte del material donde se aplicará el adhesivo por lo que será más estable a la presión que se le pueda someter y mantendrá una unión resistente al exterior, igualmente comparte las propiedades térmicas del acrílico.

El acrílico mantiene un grado de solubilidad de $\delta = 9.5$ por lo que para su solubilidad con los solventes a emplear, no debe excederse ni estar por debajo de esta (± 0.1 máx). La mezcla de dos solventes genera un grado de solubilidad aproximado al del acrílico de acuerdo a lo siguiente:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{1}{\delta_{\text{solventeA}}} + \frac{1}{\delta_{\text{solventeB}}} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 6)}$$

Por lo tanto, si el valor de δ resultante es un tanto menor que el del acrílico, se producirá un hinchamiento de la superficie, por otro lado si es un tanto mayor se producirá una degradación del polímero.

La mayoría de adhesivos polimerizables traen consigo un sistema catalizador y sustancias iniciadoras del proceso, las marcas de productos de adhesivo para polímeros producen un tipo de adhesivo basado en esta técnica de pegado. Este está compuesto de una solución polimérica MMA (Monómero de Metil-Metacrilato), estabilizantes y un sistema catalizador (Dibutilftalato). De acuerdo al tiempo de curado del material, se debe realizar una mezcla adecuada según la proporción establecida por el fabricante, la recomendada es 95% de la solución polimérica y 5% del sistema catalizador para un

tiempo de curado de 60min. El tiempo de secado aproximado para toda la pieza será de 24 horas debido al grosor del tanque. [18]

La estructura que sostendrá al sistema se construirá en base a acero al carbono, se respetará los requerimientos de soldadura propuestos en los criterios de diseño. Las dimensiones de la estructura se podrán apreciar en el plano Ensamble General del *anexo Planos*.

El ingreso del líquido hacia el tanque de proceso requiere acoplar una tubería de entrada de PVC 1"Φ ubicada a una altura de 1244mm, la cual será acompañada de una válvula manual de ingreso de líquido proveniente del tanque de almacenamiento de agua ubicado en la parte inferior del sistema. La evacuación del líquido requiere de una tubería PVC 1"Φ ubicada en la parte inferior del tanque de proceso a una altura de 868mm también acompañada de una válvula manual, esta conduce el agua de retorno al tanque de almacenamiento. Las dimensiones y distribución se podrán apreciar en el plano Ensamble General del *anexo Planos*.

Como se mencionó en el capítulo anterior, se hará uso de un circuito integrado de precisión para sensar la temperatura, sus dimensiones y especificaciones se muestran en su hoja de datos [13]. Debido al tipo de sensor - integrado, deja libre sus pines al medio externo, por lo que es imposible sumergirlo en el líquido. Por esta razón se diseña un cobertor capaz de permitir la transmisión de calor hacia el integrado y a su vez proteger las conexiones. Se usará una lámina de cobre en forma de capucha como cobertor del integrado. Esta pieza estará conectada con un tubo de PVC de 1/2" el cual alojará los cables de conexión del integrado. La figura 13 nos muestra cómo quedará finalmente el sensor de temperatura encapsulado.



Figura 13. Sensor de Temperatura encapsulado

3.4.1 ETAPA DE CALENTAMIENTO

En el capítulo anterior se mencionó que se usará una resistencia eléctrica para calentar el agua desde una temperatura de 25°C hasta 45°C, de manera que exista una diferencia de temperatura de 20°C. Adicionalmente, se considera la masa a calentar la cual según requerimiento de diseño será 20Kg, y el tiempo límite para lograr esa diferencia de temperatura. Con estos datos se realiza un cálculo aproximado del calor necesario para la operación del sistema.

A continuación se muestra **el cálculo aproximado de calentamiento para resistencia eléctrica**, sabiendo que:

- $Dt = 20^{\circ}\text{C}$
- Masa diseño (agua) = 20Kg
- Tiempo = 900s (15min.)
- C_p agua = 4.2 KJ/Kg°C

Entonces:

$$Q = M \times C_p \times Dt \dots \dots \dots \text{(Ecuación 7)}$$

$$Q = 20\text{Kg} \times 4.2 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}} \times 20^{\circ}\text{C} = 1680\text{KJ}$$

Y el calor en Watts será:

$$q = \frac{Q}{t} = \frac{1680\text{KJ}}{900\text{s}} = 1.867\text{KW}$$

La potencia obtenida en el cálculo es 1.867KW proporciona la suficiente energía calorífica a la masa de líquido, sin embargo no se han considerado las pérdidas en las paredes del tanque, ni las pérdidas por el material usado [1], por este motivo se realiza el siguiente cálculo en el que se obtendrán las pérdidas en las paredes del tanque, las pérdidas por el espesor y finalmente la energía necesaria que debe proveer la resistencia eléctrica.

El cálculo para obtener el calor perdido debe considerar lo siguiente:

- Temperatura ambiente = 25°C
- Temperatura superficial interna = 45°C (crítico)
- Longitud Característica (altura para cara lateral) = 0.5m
- Longitud Característica (diámetro para tapa) = 0.15m
- Área lateral = 0.471m²
- Área de Base + Tapa = 0.141m²
- Espesor del material = 0.006m

A continuación se muestra **cálculo de pérdidas de calor en paredes del tanque**, sabiendo que:

Sabiendo que:

- Temperatura ambiente = 25°C
- Temperatura superficial interna = 45°C (crítico)
- Longitud Característica (altura para cara lateral) = 0.5m
- Longitud Característica (diámetro para tapa) = 0.15m
- Área lateral = 0.471m²
- Área de Base + Tapa = 0.141m²

Coefficiente convectivo del área lateral se calcula así:

$$CoefC = 1.42 \times \left(\frac{(Temp\ sup - Temp\ amb)}{Long.carac.} \right)^{0.25} \dots\dots\dots (Ecuación\ 8)$$

$$CoefC = 1.42 \times \left(\frac{(45 - 25)^{\circ}C}{0.5m} \right)^{0.25} = 3.57 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

Entonces el calor perdido en el área lateral será:

$$Q_l = Area \times Coef\ conv \times (Temp\ sup - Temp\ amb) \dots\dots\dots (Ecuación\ 9)$$

$$Q_l = 0.471m^2 \times 3.57 \frac{W}{m^2^{\circ}C} \times (45 - 25)^{\circ}C = 33.65W$$

Coeficiente convectivo del área de la basa y tapa se calcula así:

$$CoefC = 1.42 \times \left(\frac{(Temp\ sup - Temp\ amb)}{Long.\ carac.} \right)^{0.25}$$

$$CoefC = 1.42 \times \left(\frac{(45 - 25)^{\circ}C}{0.15m} \right)^{0.25} = 4.83 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

Entonces el calor perdido en el área de la basa y tapa se calcula así:

$$Q_{bt} = Area \times Coef\ conv \times (Temp\ sup - Temp\ amb)$$

$$Q_{bt} = 0.141m^2 \times 4.83 \frac{W}{m^2^{\circ}C} \times (45 - 25)^{\circ}C = 13.64W$$

La suma total de calores perdidos en el área lateral y la base son:

$$Q_{totalperdidaspared} = Q_l + Q_{bt} \dots \dots \dots (Ecuación\ 10)$$

$$Q_{totalperdidaspared} = 33.65W + 13.64W = 47.30W = 0.0473kW$$

A continuación se muestra **cálculo de pérdidas de calor por espesor del tanque**, sabiendo que:

- Temperatura ambiente = 25°C
- Temperatura superficial interna = 45°C (crítico)
- Conductividad térmica acrílico = $0.2 \frac{W}{m^{\circ}C}$
- Espesor del material = 0.006m
- Área total = $0.612m^2$

Entonces el calor perdido en el área lateral será:

$$Q_e = \frac{(Temp\ sup - Temp\ amb)}{\left(\frac{Espesor}{Conduct.Term \times Areatotal} \right)}$$

$$Q_e = \frac{(45 - 25)^{\circ}\text{C}}{\left(\frac{0.006\text{m}}{0.2\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \times 0.612\text{m}^2}\right)} = 1.531\text{W} = 0.00153\text{kW}$$

A continuación se muestra **cálculo de calor que debe proveer la resistencia**, luego de calcular cada pérdida de calor por pared y espesor, se procede a sumarlos:

$$Q_{totalperdidas} = Q_{totalperdidaspared} + Q_e \dots \dots \dots \text{(Ecuación 11)}$$

$$Q_{totalperdidas} = 0.0473\text{kW} + 0.00153\text{kW} = 0.04883\text{kW}$$

Sabiendo que:

- Calor necesario para calentar el líquido = 1.867KW
- Y el factor de diseño = 10%

Entonces el calor que deberá proveer la resistencia será:

$$Q_{resistencia} = (0.04883\text{kW} + 1.867\text{kW})1.1 = 2.1075\text{kW} \approx 2.2\text{kW}$$

De acuerdo a los cálculos obtenidos podemos observar que las pérdidas del espesor son nimias debido a la propiedad de aislante térmico del acrílico. Por lo tanto el total de calor en pérdidas es 0.0473kW, sumado con el calor que se le debe suministrar al líquido dan un total de 2.1075kW \approx 2.1kW, esta potencia es la que suministrará la resistencia eléctrica sobre el sistema.

La resistencia eléctrica se ubica en la parte inferior del tanque, acoplado en posición vertical, así también para una mejor distribución del calor se usará una resistencia con forma de serpentín alrededor de la paleta de agitación. Ver detalles de instalación y dimensiones en el plano *Ensamble del tanque del anexo Planos*.

3.4.2 ETAPA DE ENFRIAMIENTO

Una vez realizado el análisis en los capítulos anteriores, respecto al uso de tecnologías de enfriamiento y por cuestiones de costo e instalación se eligió usar las celdas Peltier,

debido a su capacidad de transferencia de calor o capacidad de bombeo a través de su estructura. En el mercado internacional se consiguen celdas de capacidad de transferencia de calor que van desde 5W hasta 240W así como la variación de precio respectivamente.

La selección de las celdas se debe considerar, que en su posibilidad un conjunto de estas deberían extraer la misma cantidad de calor que lo que provee la resistencia sobre el líquido en un determinado tiempo, por lo tanto si se usara una celda Peltier que provea de 136W serán necesarias 10 celdas Peltier aproximadamente para decrementar una diferencia de temperatura de 15°C en 900s.

A continuación se muestra **el cálculo de celdas Peltier**, considerando los siguientes datos del sistema y la celda elegida:

- $Dt = 15^{\circ}\text{C}$
- Masa diseño (agua) = 20Kg
- Tiempo = 900s (15min.)
- C_p agua = 4.2 KJ/Kg°C
- Calor transferido por celda (Q_{bombeo}) = 136W

Entonces, el calor a extraer en estas condiciones será:

$$Q = \frac{M \times C_p \times Dt}{t}$$

$$Q = \frac{20\text{Kg} \times 4.2 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}} \times 20^{\circ}\text{C}}{900\text{s}} = 1.37\text{kW}$$

Para lo cual serán necesarias N cantidad de celda Peltier trabajando a plena carga:

$$N = \frac{Q}{Q_{bombeo}}$$

$$N = \frac{1.37\text{kW}}{136\text{W}} = 10.07 \approx 10$$

De acuerdo a los requerimientos propuestos en los criterios de diseño de "Proceso", es suficiente lograr este decremento de temperatura, ya que el consumo de recursos sería mayor tanto para la parte eléctrica como para la disposición mecánica en el sistema.

Cada celda Peltier escogida trabaja a plena carga consumiendo 13A de corriente máximo y a un voltaje de 15.4V máximo, en estas circunstancias, la celda transferirá el calor desde el lado caliente de la base del tanque hacia el disipador, y este a su vez transportará el calor irradiado por las aletas del disipador hacia el medio externo por medio del flujo de aire originado por el ventilador.

El diseño del disipador requiere utilizar un software recomendado por el fabricante de la celda Peltier, [14] para el cual se dieron las siguientes condiciones:

- Temperatura entre la base de cobre y Peltier = 45°C en el caso máximo.
- Temperatura entre Peltier y disipador = 35°C.
- Potencia extraída por cada Peltier = 136W.
- Usa grasa térmica entre celdas y la base de cobre, así como también entre el disipador y las celdas.
- Tamaño de la celda Peltier: 0.05m x 0.05m x 0.003m

Se introdujeron estos datos en el software THERMO-TOOLS [24] y se generó el disipador con las características recomendadas:

- Alto = 0.0743m
- Largo = 0.3m
- Ancho = 0.309m
- Espesor = 0.008m

Véase el gráfico en el anexo A1.

Además se obtuvieron las características para obtener un ventilador adecuado que pueda evacuar el calor disipado:

$$\text{Flujo de aire} = 0.382 \frac{m^3}{s} \text{ o } 810 \text{ CFM}$$

En el mercado nacional existen Ventiladores que trabajan con AC que pueden proveer hasta 6327CFM.

Se considera que la base de la cámara de ventilación debe contar con una derivación del líquido hacia el tanque de reserva (tal como estipula en el plano Ensamble Tanque del *anexo Planos*) debido a filtraciones que podrían ocurrir por fugas en la base del tanque.

3.4.3 ETAPA DE AGITACIÓN

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo anterior, el agitador se compone de un motor eléctrico, un eje de transmisión, acoples, rodamientos para evitar el desalineamiento del eje y unas paletas helicoidales. La figura 14 muestra las partes principales del Agitador.

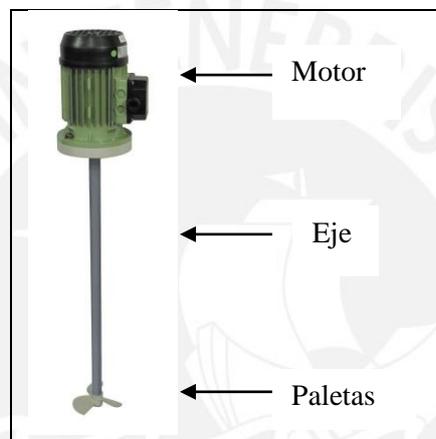


Figura 14. Agitador

Fuente: revisar [10]

La selección del motor adecuado requiere tomar en cuenta la potencia a la que trabajará al igual que el torque de diseño [15]. El cálculo de esta potencia depende del tipo de flujo que circule en el sistema, y para determinar esto se debe calcular el Número de Reynolds que involucra el líquido, las RPM, el diámetro de las paletas y la viscosidad dinámica del líquido (Ver anexo A2):

- Viscosidad dinámica media = 0.000735Kg/ms
- Valores medio de viscosidad en temperaturas 25°C y 60°C.
- RPM = 800 (criterio de diseño)
- Diámetro de paletas = 100mm
- Diámetro de eje = 10mm

Luego de haber realizado los cálculos se determina que el número de Reynolds es 353404.44, lo cual significa que es mucho mayor al límite establecido para flujo laminar que es de 10000. Por lo tanto se determina que el flujo será turbulento.

En caso de flujo turbulento, la potencia depende de la constante de agitación ($K=1$) para paletas helicoidales, la cual se encuentra en la tabla 1 del anexo A2, por ello también es necesario saber la densidad del agua a 25°C que es aproximadamente $993.95 \frac{Kg}{m^3}$. Con estos datos se aplican sobre la siguiente fórmula:

$$Potencia_{util} = k\rho\eta^3 D^5 \dots\dots\dots (Ecuación 12)$$

Con este valor de potencia obtenido (126.71W) se determina el valor de Torque requerido, si se sabe que son necesarias 800 RPM

$$Torque = \frac{Potencia_{util}}{RPM} \dots\dots\dots (Ecuación 13)$$

El motor seleccionado debe contar como mínimo con este valor de Torque (9.50Nm), caso contrario la fuerza generada no será suficiente para producir una circulación de flujo adecuado en el interior del tanque. Las dimensiones del sistema están en el plano Ensamble Tanque del *anexo Planos*

3.5 DISEÑO DEL SUB-SISTEMA ELÉCTRICO

El diseño del Sub-Sistema en mención se realizó en base a la distribución indicada en la *figura 15*, la cual explica la distribución eléctrica del Sistema de Control de Temperatura. Asimismo, se dividirá en cinco partes que serán explicadas en el siguiente numeral.

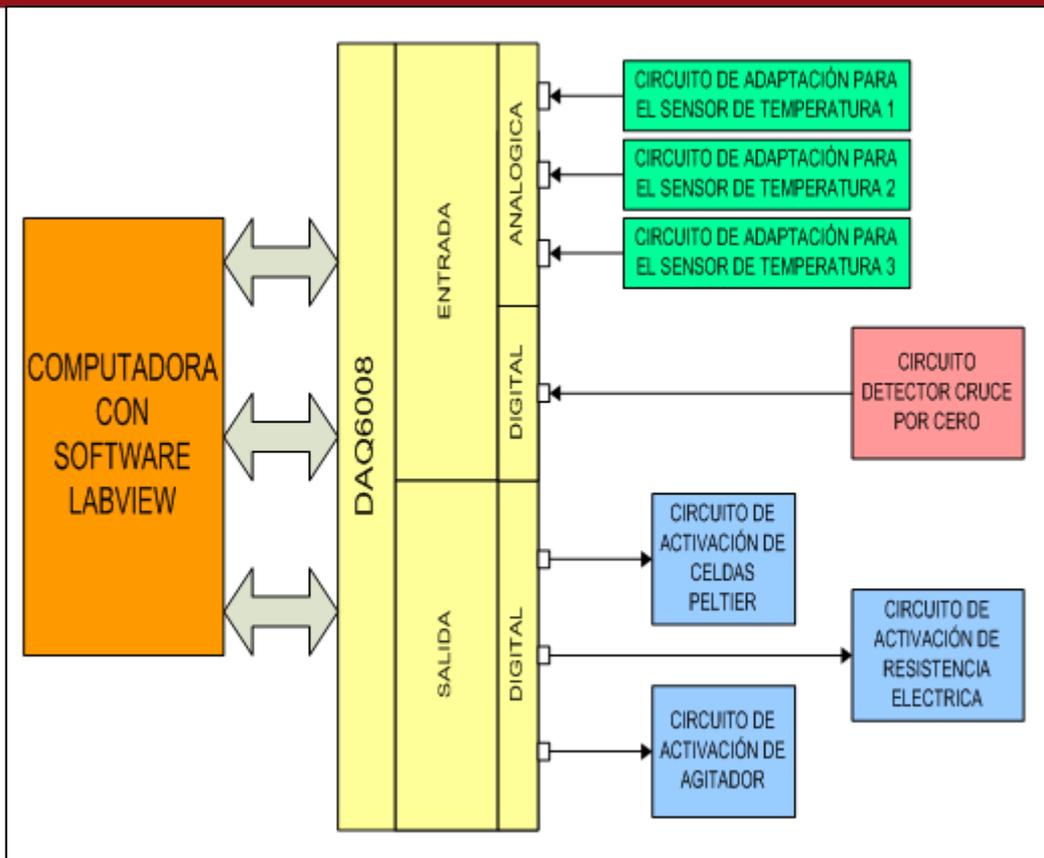


Figura 15. Distribución eléctrica del Sistema de Control de Temperatura

3.5.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

En base a los criterios de diseño se usará una PC con software de control de procesos como controlador, para esto es necesario contar con un dispositivo capaz de recibir y enviar datos de la planta al computador, por lo que se necesita una tarjeta de adquisición de datos. La figura 16 muestra a la tarjeta escogida para esta ocasión que es de la empresa National Instruments, el modelo es NI-6009 USB MULTIFUNCTION I/O DEVICE, la cual cuenta con 8 entradas analógicas que pueden trabajar con hasta 14 bits a una velocidad de 48Ksamples/s, también posee salidas analógicas de 12 bits, limitadas solo con el tiempo de software. Adicionalmente, tiene 12 entradas y salidas digitales TTL/CMOS, trabaja a 32bits, posee una entrada contador de hasta 5MHz y es alimentado por el BUS USB.

El software de control será el Lab-View el cual contará con el Upgrade del DAQ-6009.



Figura 16. Tarjeta de Adquisición de Datos NI-6009 USB

Fuente: revisar [8]

Físicamente, el DAQ 6009 es una tarjeta con circuitos integrados los cuales poseen borneras de conexión dispuestas de acuerdo al tipo de señal (analógica o digital) que reciban o envíen.

La entrada analógica del DAQ6009 puede ser sometida hasta una diferencia de voltaje de 20V como también puede trabajar con referencia a tierra en un rango de $\pm 10V$, de acuerdo a la configuración del programador. Las salidas analógicas pueden proveer hasta un máximo de 5mA y su rango de voltaje está entre 0 y 5V. Las I/O digitales cuentan con una resistencia pull-up interna de 4.7k Ω a 5V, para una gran impedancia y su rango máximo absoluto de voltaje será -0.5 a +5.8V.

Adicionalmente, el DAQ-6009, cuenta con una fuente de +5V, que puede otorgar hasta 200mA como máximo, seguidamente se debe colocar borneras por cada terminal reflejado del DAQ, de acuerdo a los criterios de diseño propuestos. Para más información revisar [8].

3.5.2 CIRCUITO DE ADAPTACIÓN PARA EL SENSOR DE TEMPERATURA

En base al criterio de diseño, el sensor de temperatura escogido es el LM335, el cual es un integrado que opera como un terminal Zener que mantiene una referencia de voltaje que depende de la variación de la temperatura. De acuerdo a su hoja de datos mantiene una salida en la relación 10mV/°K, este sensor es de fácil calibración y opera con corrientes que van desde los 400uA hasta los 5mA debido a su resistencia dinámica que

es menor a 1Ω . Su rango de trabajo abarca desde -40°C hasta $+100^{\circ}\text{C}$, valores en los cuales su precisión varía 1°C .

En primera instancia se ubicó un circuito de adaptación del sensor de precisión lineal, a 25°C (298°K) generará en su salida un voltaje de 2.98V . Al tener este parámetro lineal es necesario referenciar la señal de voltaje en $^{\circ}\text{C}$, por lo que se tomó de referencia el circuito "Medidor de temperatura en grados centígrados" contenido en las aplicaciones que posee la hoja de datos del dispositivo. (Ver detalle de cálculos en Anexo B2)

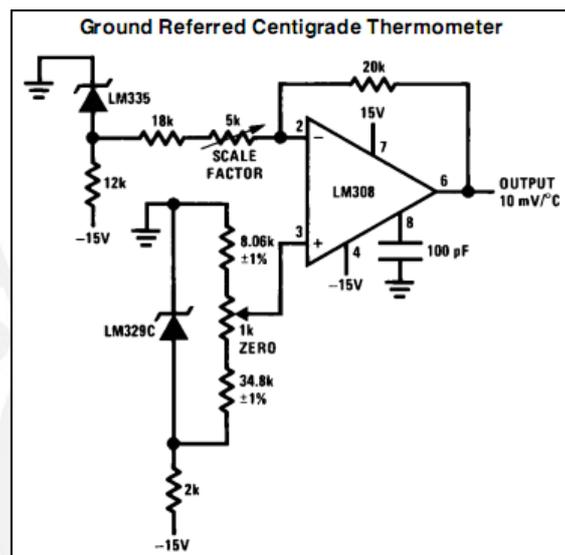


Figura 17. Circuito Medidor de temperatura en $^{\circ}\text{C}$

Fuente: revisar [13]

La figura 17 muestra la disposición del circuito señalando los elementos que lo componen. Como se puede observar existen dos ramas de circuito conectados a la entrada del Amplificador Operacional de Precisión LM308N, cada rama trabaja como voltajes de referencia sobre los terminales de entrada del OPAMP. En la primera rama se encuentra el sensor de temperatura el cual cuenta con una resistencia que le proporciona un factor de escala reflejado en la salida de la OPAMP.

En la segunda rama se encuentra un integrado de precisión que mantiene un voltaje de referencia LM329C, este mantiene un voltaje entre bornes de 6.9V sobre un divisor de voltaje a la entrada del OPAMP. Se genera una diferencia de voltajes en la salida de la OPAMP limitado por el factor de escala de la resistencia de 5K . La relación de salida será

de 10mV/°C. Si bien la salida es referencial, es necesario calibrarla de acuerdo a la temperatura que se obtenga en el medio ambiente.

Luego de la etapa anterior, es necesario amplificar la señal hasta obtener una relación de 0.1V/°C, se propone usar un Amplificador de Instrumentación integrado INA121P. Este dispositivo de bajo consumo de energía, ofrece una excelente precisión, al tener 3 OPAMPS integradas se hace viable su uso en aplicaciones de propósito general como es el caso de sensores. Cuenta con una corriente de bias pequeña 4uA lo cual permite trabajar con altas impedancias y con un rechazo en modo común CMRR altísimo (100dB) entre las frecuencias de 10Hz y 1kHz para una ganancia de 10V/V [13] ideal para los valores a trabajar. A continuación se presenta la configuración de la entrada al circuito

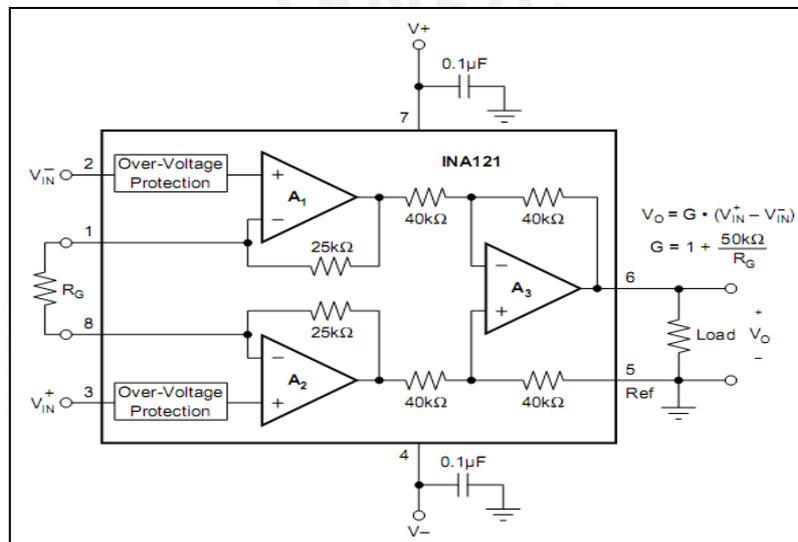


Figura 18. Amplificador de Instrumentación INA121P

Fuente: revisar [23]

Según lo que señala la figura 18 el circuito cuenta con dos entradas de operación. La señal a amplificar es V_{in}^+ que proviene del circuito anterior, por lo tanto V_{in}^- será referenciado a GND. De acuerdo a la ecuación del circuito para determinar la ganancia requerida es necesario calcular la resistencia adecuada:

$$V_o = G \times (V_{in}^+ - 0) \dots \dots \dots (Ecuación 14)$$

Para una $G=10$

$$R_G = \frac{50K}{G-1} = \frac{50K}{9} = 5.55K \dots \dots \dots \text{(Ecuación 15)}$$

El cálculo de un valor cercano y preciso, requiere fijarlo con un potenciómetro de precisión. El rango que se trabaja será entre 15°C a 60°C, por lo que la salida deberá respetar los valores teóricos al momento de alcanzar estas temperaturas. Según hojas de datos a 60°C el sensor genera un error de offset de +0.4°C, por ello se debe tener en consideración este valor al momento de realizar el algoritmo de control y las pruebas.

Adicionalmente, se consideró usar un filtro activo a la salida del Amplificador INA121P debido a que luego de realizar algunas pruebas y observaciones en el Osciloscopio de laboratorio (Figura 19.), pues se obtuvieron como resultado que en frecuencias cercanas a los 10kHz y 40kHz se producía señales que alteraban la uniformidad de la señal, también llamado ruido. Este ruido afecta directamente a la tarjeta de Adquisición de datos, debido a que esta no cuenta con un filtro interno.

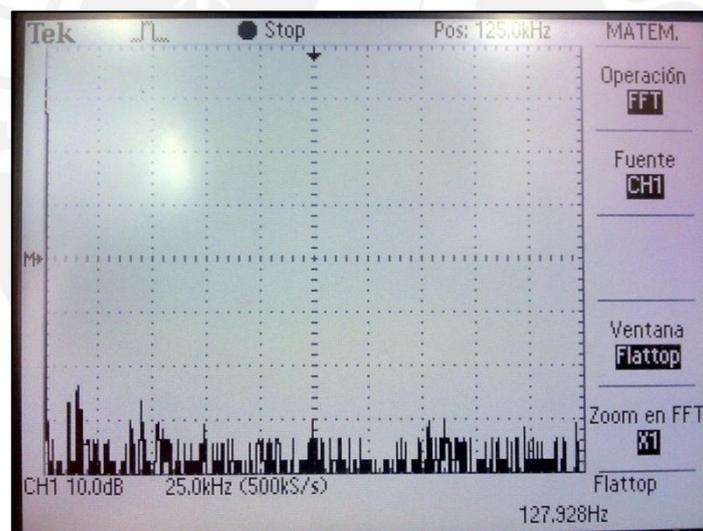


Figura 19. Ruido producido entre 10kHz y 40kHz

El diseño del Filtro requirió lo siguiente [19]:

- Filtro Pasa-Bajo.
- Tipo Butterworth.
- La topología Sallen-key.
- Atenuación máxima = -0.5dB.

- Atenuación mínima = -40dB.
- Frecuencia de corte = 15kHz.
- Frecuencia de rechazo = 20kHz.

Ver detalles de cálculo de filtro en anexo B2.

Los valores obtenidos de resistencias y condensadores son los siguientes:

R1 = 1.2M R2 = 100k R3 = 24k R4 =270k

C1 = 0.1uF C2 = 2.2uF C3 = 3.3uF C4=1uF

Por lo tanto, el filtro quedará así:

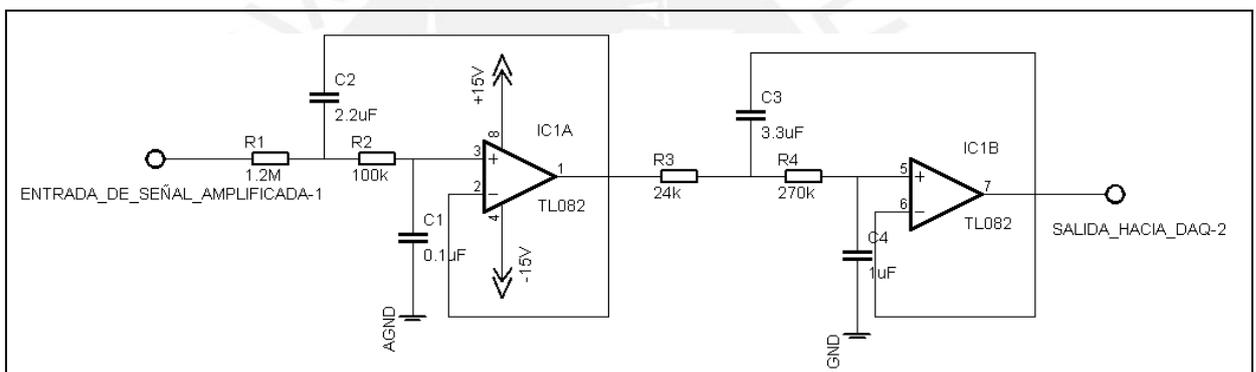


Figura 20. Filtro de salida para sensor de temperatura

3.5.3 CIRCUITO DE CONTROL DE POTENCIA DE LA RESISTENCIA

La resistencia propuesta en la parte mecánica trabaja en base a una alimentación AC, debido a esta característica es necesario realizar un circuito de activación y control que use una salida digital de la tarjeta de adquisición de datos.

El programador necesita una manera de activar la resistencia de acuerdo a un parámetro eléctrico que pueda manejar desde el software, por ello, existen diversas maneras de proporcionar un control que relacione el porcentaje de calor entregado por la resistencia en un tiempo determinado. Uno de los métodos más usados es mediante la activación de la resistencia con ángulos de disparo por medio de un detector de Cruce por Zero y un TRIAC.

- **CIRCUITO DE CRUCE POR CERO**

La forma de onda que tiene la línea de tensión domestica 220AC mantiene una frecuencia de aproximadamente 60Hz, el periodo es de 16ms, lo cual significa que tanto una comba positiva y una negativa componen este lapso de tiempo. El control del ángulo de disparo sobre la resistencia requiere tener una referencia, la cual es el cruce por Zero que recibirá el controlador como señal de entrada [20]. Esta señal recibida por el DAQ será de forma cuadrada, la cual será preparada para su recepción como entrada digital; su lectura en el software deberá mostrar que su frecuencia sea la misma que de la línea, es decir 60Hz aproximadamente.

Para lograr controlar el ángulo de disparo sobre la resistencia es necesario tener una referencia, esta será el cruce por Zero que recibirá el controlador como señal de entrada [20]. La señal recibida por el DAQ será de forma cuadrada, la cual será preparada para su recepción como entrada digital. La lectura de esta señal en el software deberá mostrar que la frecuencia sea la misma que de la línea, es decir 60Hz aproximadamente.

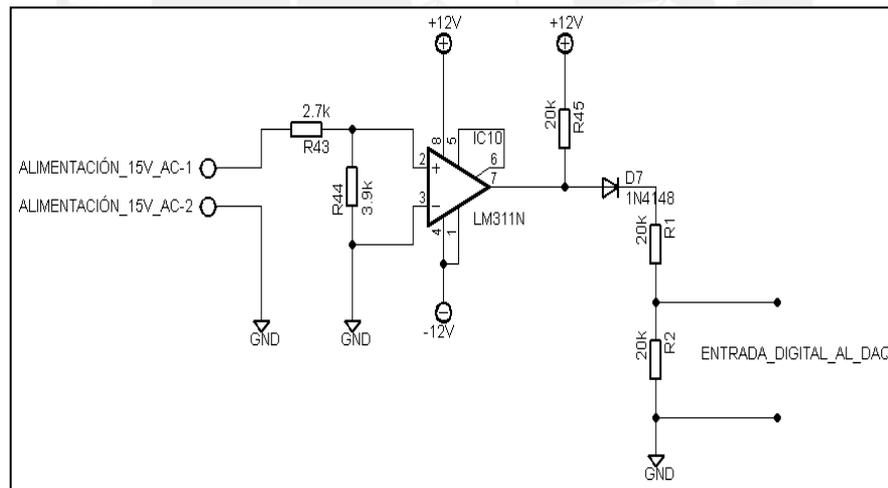


Figura 21. Circuito de Cruce por Zero

Según se muestra en la figura 21, la señal de entrada al circuito será provista por un transformador de 220VAC a 15VAC., esta señal ingresa al comparador de voltaje LM311N, el cual recibe en su entrada positiva como voltaje máximo 7.09V limitado por el divisor de voltaje, y este lo compara con la otra entrada proveniente de GND. En la salida de voltaje del comparador se ubica un voltaje de referencia para cubrir las deficiencias de corriente y un diodo para limitar la salida en voltaje

positivo, con ayuda de las resistencias se obtiene un valor máximo de salida en 5V.

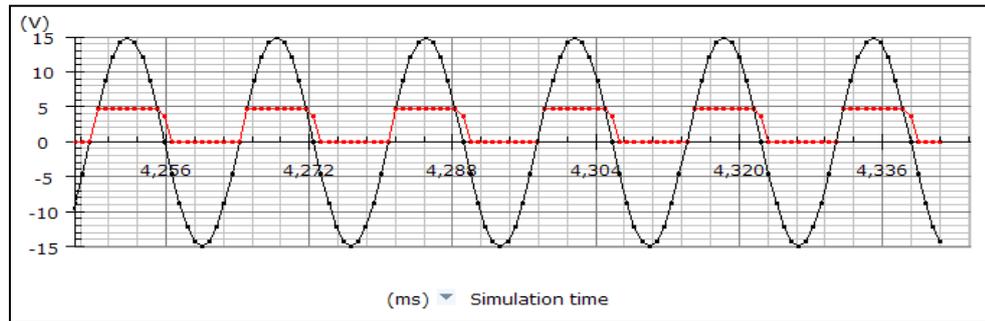


Figura 22. Resultado de circuito de Cruce por Zero – Figura generada por simulador Yenka electronics

De acuerdo a la figura22 la línea roja pertenece a la salida del detector de cruce por zero y la línea negra es la que corresponde a la línea proveniente del transformador de 15V., el cambio es casi inmediato, por lo tanto el programador al recibir cada cambio en alta y en baja deberá mandar una señal de disparo con un determinado ángulo.

- **ANGULO DE DISPARO POR TRIAC**

La activación por ángulo de disparo genera un uso adecuado de la energía en cuanto a eficiencia. Por ello, en este caso se usará el disparo para producir una forma de onda sincronizada con el detector de Cruce por Zero.

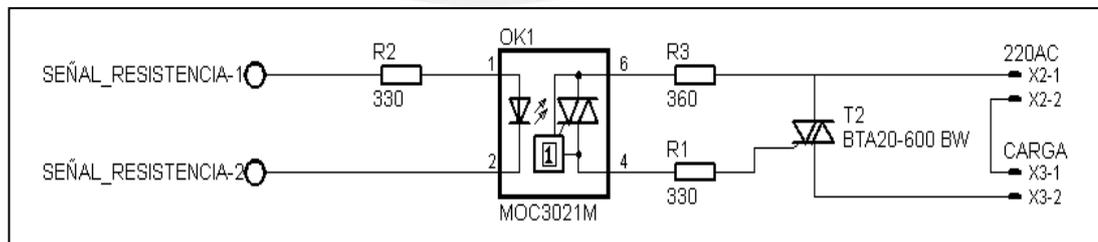


Figura 23. Circuito de Activación de Resistencia Eléctrica

En la figura 23 se muestra el circuito propuesto para la activación. La tarjeta de adquisición de datos enviará una señal de 5V sobre la conexión “SEÑAL_RESISTENCIA” en el momento que se desea activar la resistencia, esta

señal recorre por una resistencia de 330Ω, la cual limita la corriente a la entrada del diodo LED integrado dentro del MOC3021, el cual es un OptoTriac.

De acuerdo a la hoja de datos del MOC3021, la corriente directa de disparo del LED es 10mA y la máxima es 60mA, por tanto el Voltaje de E-R del diodo típico es 1.15V.

$$R = \frac{5V - 1.15V}{(10mA)} = 385\Omega \dots \dots \dots \text{(Ecuación 16)}$$

De manera comercial podemos encontrar valores menores de resistencia, por eso usaremos 330 Ω.

Por recomendación de la hoja de datos del MOC3021 se coloca una resistencia de potencia de 360Ω entre el TRIAC y los terminales de mantenimiento, de modo que pueda limitar la corriente AC de ingreso y así no dañar al dispositivo. Luego se coloca una resistencia de 330Ω entre el terminal 6 el Gate del TRIAC, con el fin de evitar el envío de corrientes superiores a 1mA dispuesto en la hoja de datos del TRIAC BTA20 dado que con este valor en Gate se activaría el TRIAC.

Finalmente, se propone usar el TRIAC BTA20 que es un semiconductor que soporta 20A de corriente AC y hasta 600V. Su activación requiere sostener una corriente de Gate-Terminal mayor a 1mA o sostener un voltaje de 1.5V [21]. El TRIAC trabaja en comba positiva o negativa de una onda de 60Hz, existe el caso en el que se active luego que el voltaje AC supere el de mantenimiento permitido entre terminales, llegue hasta el máximo en AC y decretezca hasta por debajo de mantenimiento, en este momento se desactiva el TRIAC. Esto significa que el voltaje de ánodo del SCR que compone el TRIAC debe ser mayor al voltaje del cátodo para que conduzca, por tanto los cruces por zero bloquean al SCR.

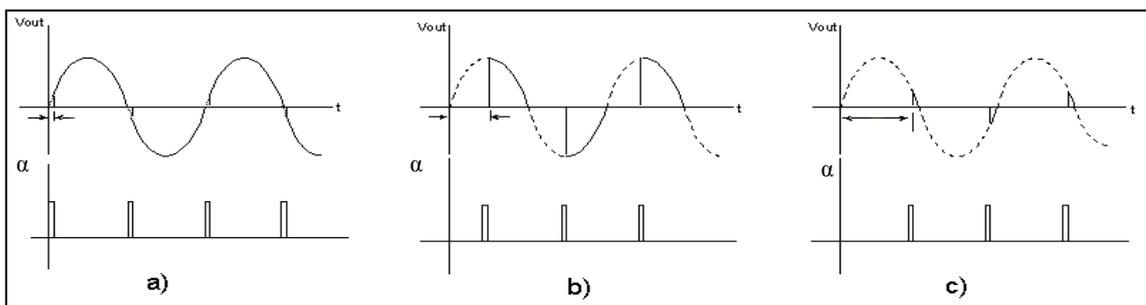


Figura 24. Periodos de Disparo

Fuente: revisar [22]

En la *figura 24* nos muestra la onda de funcionamiento del TRIAC cada vez que se dispara un pulso en el GATE del TRIAC. En la parte a) de la *figura 24* el ángulo de disparo es ligeramente corto respecto al periodo completo. En la figura b) el ángulo de disparo se presenta en la mitad de cada comba; y en la figura c), el ángulo de disparo se presenta cerca al término de la comba. Para más detalles Ver anexo B1.

$$P = \frac{220^2}{13} \left[\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{2\pi} \right] \dots\dots\dots (Ecuación 17)$$

En caso la relación en una resistencia eléctrica respecto a la potencia consumida con la potencia entregada mediante el calor sea casi proporcional, se logrará determinar un parámetro de control para el programador mediante la modificación del ángulo de disparo.

Otra forma de controlar el porcentaje de energía entregado por la resistencia es enviando intervalos de pulsos de activación cada “n” cantidad de periodos de onda así como se muestra en la siguiente figura:

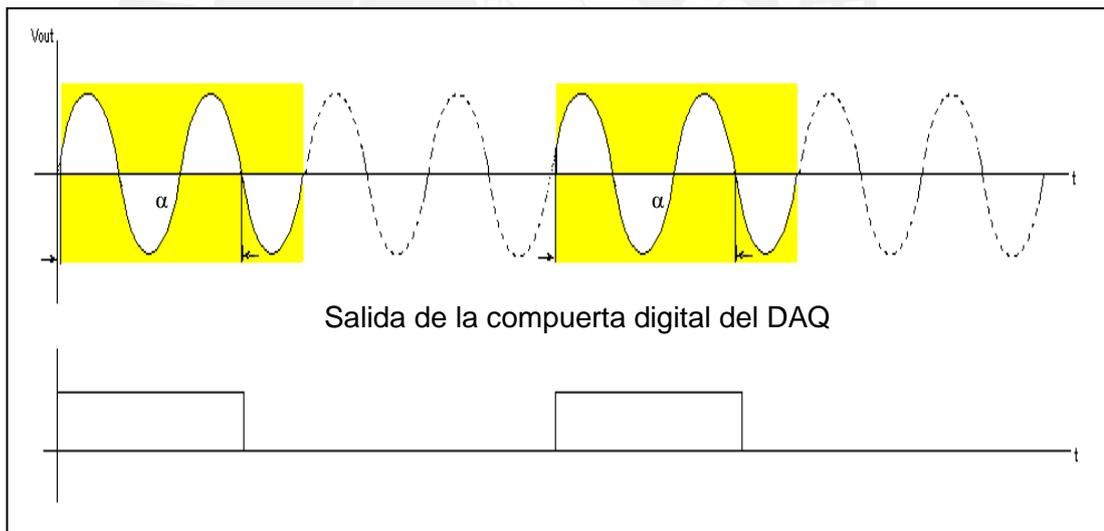


Figura 25. Activación por Intervalo de Periodos

La *figura 25* muestra 2 zonas en el recorrido de la onda, la primera es la zona de conducción del TRIAC, inicialmente se produce un disparo de ángulo y se mantiene hasta unos ms después de empezada la cuarta onda, de manera que el SCR interno estará activo solo hasta el siguiente cruce por zero. Posteriormente, luego de una inactividad de 2 periodos nuevamente se manda un disparo igual al

anterior. Por lo tanto el tiempo de activación y desactivación será otro parámetro a controlar por el programador.

3.5.4 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN Y ACTIVACIÓN DE CELDAS PELTIER

Las celdas Peltier propuestas para el diseño poseen las siguientes características:

- Voltaje de alimentación Máx.: 15.4V.
- Corriente Máx.: 13A.
- Resistencia interna: $1.09\Omega \pm 0.2$
- Calor extraído: 136W.

El cálculo de la cantidad estimada de celdas a usar en el proceso de enfriamiento, requiere un total de 10 celdas. Por lo que será necesario adecuar un orden de instalación que pueda otorgar el máximo beneficio. De acuerdo al funcionamiento será necesario tener una fuente de alimentación DC que otorgue de manera constante sobre cada celda una potencia de 200W aproximadamente, de manera que la celda pueda cumplir con bombear 136W de calor hacia el medio externo.

Usar una fuente Trifásica con rectificación de onda completa y filtro es una opción viable, dado que otorga un voltaje DC casi invariable, además de mantener un voltaje de rizado tenue con un $RF < 0.05$, mantiene un voltaje de pico inverso repetitivo de 1.05Vcd y una razón de rectificación de 0.998. Además, la corriente rms en cada diodo aborda 0.579 Icd y la corriente promedio en cada diodo es de 0.333 Icd. Estas características [22] que proporciona la configuración electrónica, en comparación con otros tipos de rectificación es la más eficiente debido al número de fases y además el bajo precio de los componentes que se usan.

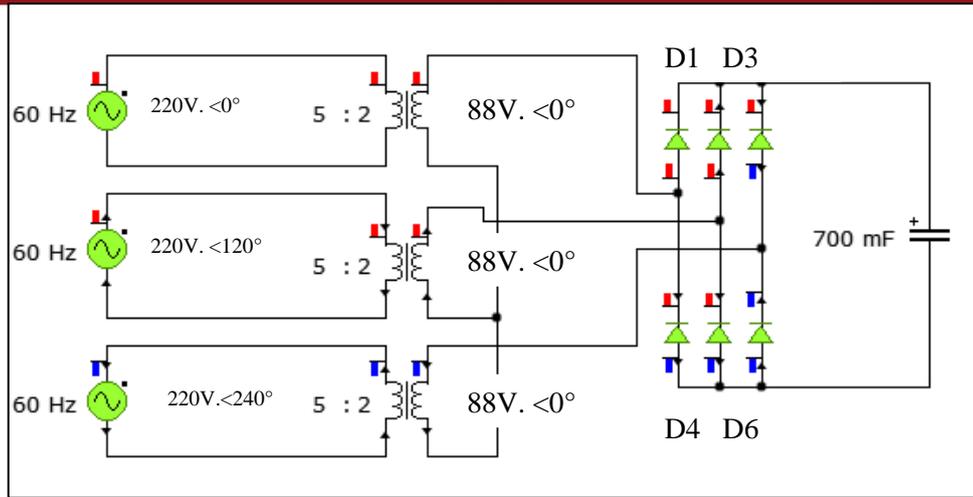


Figura 26. Muestra la distribución para obtener un voltaje DC de aproximadamente 146V a la salida de la rectificación

Según la figura 26 donde se muestra el esquemático del circuito de distribución, si el voltaje de entrada es $V_M = 220V$. AC, a la salida del transformador se obtendrá aproximadamente $V_m = 88V$. AC debido a razón de cambio en el transformador 5:2. Luego actúa el puente de diodos durante los 120° , y la secuencia de accionamiento es D1-D2, D3-D2, D3-D4, D5-D6 y D1-D6. El par de diodos conectados a un par de líneas de alimentación que tienen el mayor voltaje instantáneo de línea a línea es el que conduce.

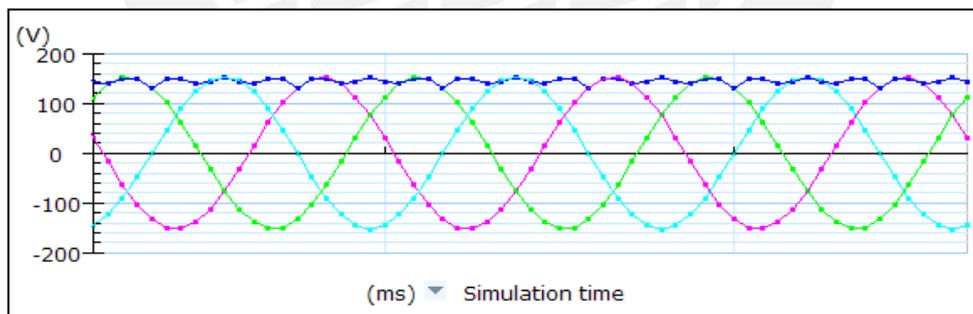


Figura 27. Onda trifásica rectificada- Figura generada por simulador Yenka Electronics

La línea color Azul en la figura 27 marca la onda rectificada a la salida del puente de diodos. El valor de voltaje en línea será:

$$V_l = \sqrt{3}V_m \times \sin(\omega t + \pi(4K + 1)/6) \dots \dots \dots (Ecuación 18)$$

Donde $K=0, 1, 2, \dots$

En base a los distintos cálculos realizados se logra obtener las características eléctricas del circuito (Ver anexo B4):

- Voltaje Pico = 152.42V.
- Voltaje Promedio = 145.55V: Voltaje aproximado que alimentará a las celdas.
- Voltaje rms = 145.67V.
- Corriente Pico = 13.98A.
- Corriente Promedio = 12.44A: Corriente aproximada que atravesará las celdas.
- Corriente rms = 12.72A.
- Eficiencia del sistema (η) = 99.84%: Es característico de alimentación trifásica, alta “n”.
- Factor de rizo = 4.06%: Es característico de alimentación trifásica, bajo FR.
- VA del transformador = 2022.01VA: Potencia de selección del Transformador.
- TUF = 0.95: Esto indica que el transformador es usado eficientemente.

De acuerdo a la *figura26* se observa un condensador a la salida del sistema, este elemento reduce el voltaje de rizado producido por el rectificador y que afectaría a las celdas por su variación de voltaje. El cálculo para determinar un valor adecuado de capacitancia, requiere realizar lo siguiente:

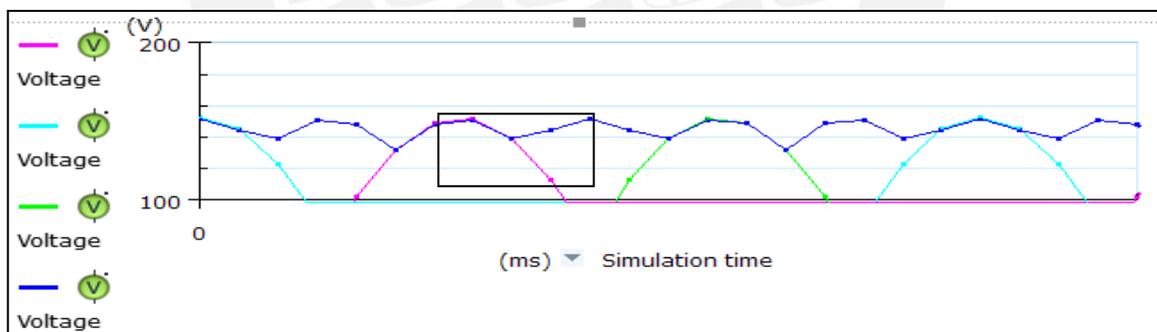


Figura 28. Tiempo entre voltajes pico- Figura generada por simulador Yenka electronics

Según la *figura 28* se determina que el tiempo en el que se produce la oscilación es la sexta parte de un periodo, entonces el voltaje rizo pico a pico comprendido para el tiempo de descarga del condensador en este periodo será:

$$V_{rpp} = \frac{\sqrt{3}V_m}{12fRC} \dots \dots \dots (Ecuación 19)$$

Esta ecuación es propia para filtros en rectificadores trifásicos [22], considerando que el tiempo de descarga será aproximadamente la mitad del tiempo de carga. Ahora también es necesario saber voltaje promedio en la carga V_{cd} :

$$V_{cd} = 1.654V_m - \frac{V_{rpp}}{2} = 1.654V_m - \frac{\sqrt{3}V_m}{24fRC} \dots \dots \dots (Ecuación 20)$$

El voltaje rms en la salida V_{ca} se determina de la siguiente manera:

$$V_{ca} = \frac{V_{rpp}}{2\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}V_m}{24\sqrt{2}fRC} \dots \dots \dots (Ecuación 21)$$

El FR implicado para el diseño debe ser menor a 5%, según lo obtenido anteriormente fue de 4.06% por lo que este valor serviría de referencia.

$$FR = \frac{V_{ca}}{V_{cd}} = \frac{\frac{\sqrt{3}V_m}{24\sqrt{2}fRC}}{1.654V_m - \frac{\sqrt{3}V_m}{24fRC}} \dots \dots \dots (Ecuación 22)$$

De aquí se obtiene:

$$C \geq \frac{\sqrt{3}(1+FR)}{1.654FR \times 24fR} = 18000\mu F \dots \dots \dots (Ecuación 23)$$

El valor de capacitancia puede ser igual o mayor a este, a su vez su voltaje máximo debe ser mayor al Voltaje promedio de la salida del puente de diodos ($V_{rms} = 145.67V$).

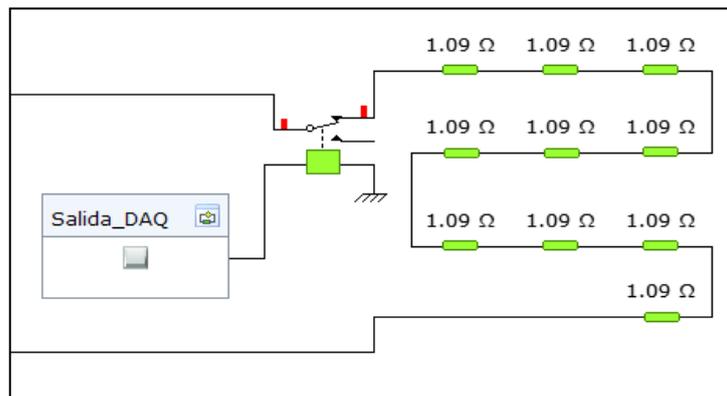


Figura 29. Celdas Peltier ubicadas en Serie- Figura generada por simulador Yenka electronics

La *figura 29* muestra la distribución de las celdas en serie, por donde pasarán aproximadamente 13A., a su vez cada celda Peltier se alimentará con un valor cercano a 14.5V ya que la alimentación de línea en DC es 145V.

Con la finalidad de poder activar el paso de energía eléctrica a través de las celdas se colocará un contactor relay DC 150VDCel cual será controlado por la salida discreta del DAQ. El tiempo de conmutación para el control de temperatura no será menos de 100ms, debido a que el proceso de cambio de temperatura es lento.

3.5.5 CIRCUITO DE ACTIVACIÓN DE MOTOR DC PARA AGITACIÓN

Del cálculo obtenido acerca de la potencia necesaria para mover el eje con los álabes, se obtuvieron los siguientes datos de diseño para la parte eléctrica:

- Potencia mecánica útil = 126.71W
- Torque = 9.503Nm
- RPM = 800rpm

Entonces para elegir un motor adecuado, se asumirá que tendrá una eficiencia de 85%, entonces la potencia eléctrica de línea será:

$$Pot_{line} = \frac{126.71W}{0.85} = 149.07W \approx 150W \dots \dots \dots (Ecuación 24)$$

La potencia equivale contar con un motor de 1/4HP, por lo que de acuerdo al criterio de diseño se optará por usar 220VAC como alimentación; sin embargo es necesario que posea un control para su activación por esta razón se determina el uso de un contactor relay 250VAC, el cual será controlado por una de las salidas digitales del DAQ.

3.5.6 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN GENERAL

Cada circuito propuesto tanto para los actuadores como para los sensores de temperatura, necesita determinadas líneas de alimentación por lo que se propone diseñar una fuente que provea de los siguientes voltajes:

- Alimentación +12VDC @ 3.2A
- Alimentación -12VDC @ 3.2A

La obtención de dichos voltajes necesita recibir la alimentación doméstica 220V AC y con ayuda de un transformador llevarlo a 34V, debido a que se necesita una alimentación negativa se propone usar un transformador de toma central 34V - 0 - 34V de 700W.

Una vez realizado lo anteriormente descrito, se colocará un puente de diodos que permita rectificar la onda completa tanto en el lado positivo como en el lado negativo, generando una señal positiva con un voltaje de rizado equivalente al Voltaje pico de la onda de entrada y una señal negativa del mismo valor.

En este sentido, se debe calcular un filtro pasivo a la salida del rectificador para reducir el voltaje rizado debido a que no es recomendable ingresar señales con una amplia variación de voltaje, obteniendo así una señal mejorada, con un voltaje de rizado mínimo aceptable. Sin embargo aún no se cuenta con el voltaje requerido, por lo que es necesario usar reguladores de voltaje para mantener señales con valores de voltaje precisos como son +12V y -12V a partir del lado negativo. Asimismo, con la finalidad de proteger la fuente será necesario usar un fusible de 5A a 250V. Para más detalles ver anexo B3.

3.5.7 PROTECCIÓN

De acuerdo a los criterios de diseño, es necesario aislar las partes eléctricas del sistema debido a que se está utilizando un líquido conductor como el agua, el cual sin el cuidado debido puede filtrar y llegar hacia las líneas eléctricas ocasionando un cortocircuito perjudicando el sistema. Por esto se considera el uso de tuberías de acero galvanizado con cobertor de PVC el cual protegerá los cables de alimentación y líneas de datos provenientes del sistema hacia las cajas de conexiones. Las dimensiones y distribución se podrán apreciar en el plano Cajas de Conexión del *anexo Planos*.

La caja de conexiones recibe de la tubería de protección los cables que transmiten la alimentación hacia el motor del agitador, las celdas Peltier, la resistencia eléctrica y los ventiladores extractores, así como también la información proveniente de las líneas de sensado. En el interior de la caja se realiza la distribución de tarjetas y conexiones tanto para el DAQ y las líneas de alimentación que vienen de la línea trifásica y la monofásica.

3.6 COSTOS

Para determinar el costo general del sistema será necesario una evaluación detallada del precio de cada subsistema, además se considerará la mano de obra tanto para la instalación como también la de diseño.

Subsistema Mecánico			
Cantidad	Detalles	Precio Unitario S/.	Precio S/.
1	Tanque de acrílico $\Phi=0.3\text{m}$, H=500mm con Tapa (Incluye mano de obra)	240.00	240.00
1	Tanque de acrílico $\Phi=0.3\text{m}$, H=275mm con Tapa (Incluye mano de obra)	200.00	200.00
6m.	Tubería PVC 1" Φ	6.00	6.00
2	Válvula manual 1" Φ	3.00	6.00
10m.	Tubería flexible con cubierta PVC 1/2" Φ	3.50	35.00
4	Codo 1" Φ	2.00	8.00
1	Niple" Φ	1.50	1.50
10	Tornillo hexagonal ISO4762 – M8x16	.25	2.50
20	Tornillo hexagonal ISO4762 – M6x40	.25	5.00
10	Tornillo hexagonal ISO4032 – M8x55	.25	2.50
10	Tornillo hexagonal ISO4762 – M8x35	.25	2.50
20	Tornillo hexagonal ISO4032 – M8	.25	5.00
60	Tornillo hexagonal ISO4032 – M6	.25	15.00
50	Tornillo hexagonal ISO4762 – M5x40	.25	12.50
30	Tornillo hexagonal ISO4762 – M6x35	.25	7.50
30	Tornillo hexagonal ISO4032 – M5	.25	7.50
30	Tornillo hexagonal ISO4762 – M5x40	.25	7.50
4	Arandela de caucho	1.00	4.00
1	Anillo de caucho	10.00	10.00
1	Acople flexible 10mm Φ	30.00	30.00
1	Rodamiento SKF 10mm Φ	25.00	25.00
4	Caja de conexión 180mm x 180mm x 80mm (WxHxD) Nema 4x	60.00	240.00

1	Caja de conexión 210mm x 310mm x 80mm (WxHxD) Nema 4x	100.00	100.00
1	Terminal de cobre para cubrir el sensor	1.00	1.00
1	Resistencia Eléctrica 2.2kW monofásica 220AC (incluye: sello de ajuste, tornillos y cerámico aislante)	250.00	140.00
10	Celdas Peltier Q=136W a 15.4V	72.00	720.00
1	Sachet grasa térmica	8.00	8.00
1	Disipador de aluminio 300mm x 309mm x70mm	120.00	120.00
1	Plancha de cobre 400mm x 40mm x 1.5mm	73.00	73.00
2	Ventilador @ 220VAC	138.00	276.00
1	Eje de acero y paletas helicoidales	15.00	15.00
Sub – Total			2326.00

Tabla 1. Costos Subsistema Mecánico

Subsistema Eléctrico			
Cantidad	Detalles	Precio Unitario S/.	Precio S/.
1	Tarjeta de adquisición de datos NI-DAQ 6009	900.00	900.00
1	Licencia software LabView	1200.00	1200.00
1	Desktop 1GB Memoria, HD 40GB, Procesador Dual core 2.17Ghz- Windows XP	1500.00	1500.00
1	Conjunto de componentes (Resistencias, diodos, Condensadores, etc.) de baja potencia.	78.00	78.00
1	LM335 sensor de precisión lineal	3.00	3.00
1	LM308 Opamp Precisión	7.00	7.00
1	TL082 Opamp Doble	3.00	3.00
1	LM311 Comparador voltaje	2.50	2.50
1	LM329C Voltaje referencia 6.9V	10.00	10.00
1	INA121P Amplificador de Instrumentación	70.00	70.00
1	MOC3021 OptoTriac	2.00	2.00
1	Triac BTA20B Triac trabaja como máximo 20A.	2.70	2.70
1	Transformador 400 W Toma central	250.00	250.00
1	Conjunto de Reguladores de voltaje	7.50	7.50
6	Diodos de potencia 20A 250V	60.00	360.00
3	Transformador 1.2kW para Trifásico	284.00	852.00

1	Condensador 700000uF 160V	33.00	33.00
1	Conjunto de Conectores, Borneras y fusibles	50.00	50.00
1	Rele - Bobina 20A	84.00	84.00
1	Motor AC ¼ HP@800 RPM para Agitador	220.00	220.00
1	Bomba ¼ HP, altura=20m0m.	90.00	90.00
1	Conjunto de Tarjetas en fibra de vidrio	200.00	200.00
10m.	Cable tipo 300V,2Cables+ shield W/DRAIN PLTC PVC, Calibre 16 AWG-1.291mm., 105 °C, Apantallado, Con cable de drenaje, chaqueta de PVC, Aislamiento 300V	2.500	25.00
10m.	Cable tipo 300V,3Cables+ shield W/DRAIN PLTC PVC, Calibre 20 AWG - 0.812mm., 105 °C, Apantallado, Con cable de drenaje, chaqueta de PVC, Aislamiento 300V	5.00	50.00
10m.	Cable tipo 300V,5Cables+ shield W/DRAIN PLTC PVC, Calibre 20 AWG - 0.812mm., 105 °C, Apantallado, Con cable de drenaje, chaqueta de PVC, Aislamiento 300V	6.00	60.00
10m	Cable Φ 1.291 mm	1.20	12.00
10m	Cable Φ 0.812 mm	0.80	8.00
Sub - Total			6079.70

Tabla 2. Costos Subsistema Eléctrico

Mano de Obra para Construcción			
Número de personas	Número de Horas	Pago por hora S/.	Total S/.
1	120	20.00	2400.00

Tabla3. Costos Mano de Obra para Construcción

Costo de diseño			
Cantidad	Detalles	Precio Unitario S/.	Precio S/.
1	Conjunto de componentes (Resistencias, diodos, potenciómetros y Condensadores) de baja potencia.	78.00	78.00
1	LM335 sensor de precisión lineal	3.00	3.00
1	LM308 Opamp Precisión	7.00	7.00
1	TL082 Opamp Doble	3.00	3.00
1	LM311 Comparador voltaje	2.50	2.50
1	LM329C Voltaje referencia 6.9V	10.00	10.00
1	INA121P Amplificador de Instrumentación	70.00	70.00
1	MOC3021 OptoTriac	2.00	2.00
1	Triac BTA20B Triac trabaja como máximo 20A.	2.70	2.70
1	Transformador 50W Toma central	20.00	20.00
1	Conjunto de Reguladores de voltaje	7.50	7.50
1	Mosfet IRF540N	4.00	4.00
360h	Costo por Ingeniería x hora	20.00	7200
Sub – Total			7409.70

Tabla4. Costo de diseño

Detalles Sub-Totales	
Sub total Mecánico	2326.00
Sub total Eléctrico	6079.70
Sub total Mano de obra para Construcción	2400.00
Sub total Costo de diseño	7409.70
Total S/.	18215.40

Tabla5. Costos Total

De acuerdo a la tabla 5, se considera el costo por diseño ya que forma parte de la ingeniería realizada, sin embargo esto se consideraría como un precio por módulo, pues si se empezara con una producción en masa, solo se consideraría los tres primeros sub-totales con lo que se reduciría el precio de venta.

Para la relación de eficiencia energética con precio:

Etapa calentamiento:

$$Q_{consume} = 220V \times 10.637A = 2340W \dots\dots\dots (Ecuación 25)$$

$$Q_{genera} = 2200W$$

$$\eta = \frac{Q_{genera}}{Q_{consume}} = \frac{2200}{2340} = 94.01\% \dots\dots\dots (Ecuación 26)$$

Etapa enfriamiento:

$$Q_{consume} = 15.4V \times 13.1A = 201.7W$$

$$Q_{genera} = 136W$$

$$\eta = \frac{Q_{genera}}{Q_{consume}} = \frac{136}{201.7} = 67.41\%$$

Etapa Agitación:

$$\eta = 85\%$$

El precio total del sistema asciende a S/. 18215.40 Nuevos Soles, que resulta mucho más económico que los módulos del sistema de control presentes en el mercado internacional, puesto que estos bordean los S/.20000 a S/.25000, y usan sistemas que otorgan un $\eta=80\%$, como son los intercambiadores de calor.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y SIMULACIONES

Las siguientes pruebas se realizaron en base a un baño térmico de aproximadamente 1L de capacidad, este contaba con un par de resistencias eléctricas que proporcionaban 990W, adicionalmente se uso un software de simulación de circuitos denominado YENKA electronics, también se realizó la implementación de las tarjetas de activación de resistencias y Peltier, sensor sumergible en agua y se implemento en protoboard los circuitos de sensado y circuito de cruce por zero.

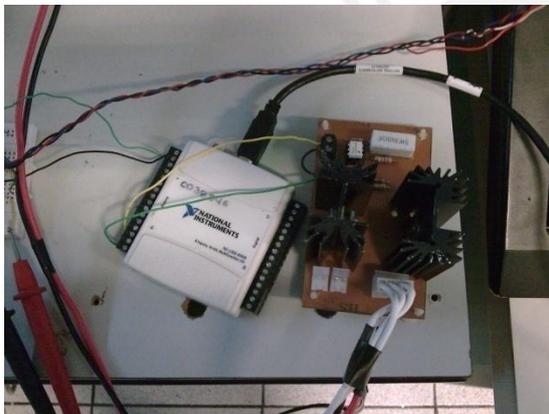


Figura 30. DAQ y tarjeta de activación de resistencia y Peltier

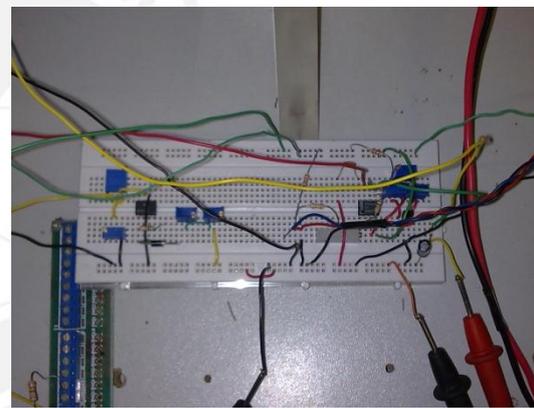


Figura 31. Circuito Medidor de temperatura en °C



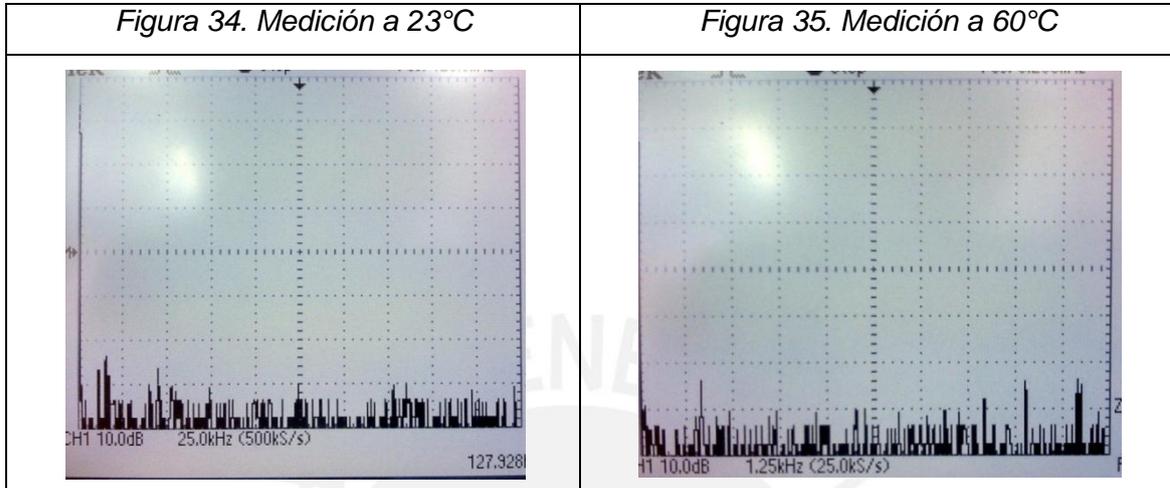
Figura 32. Baño térmico y sensor sumergible



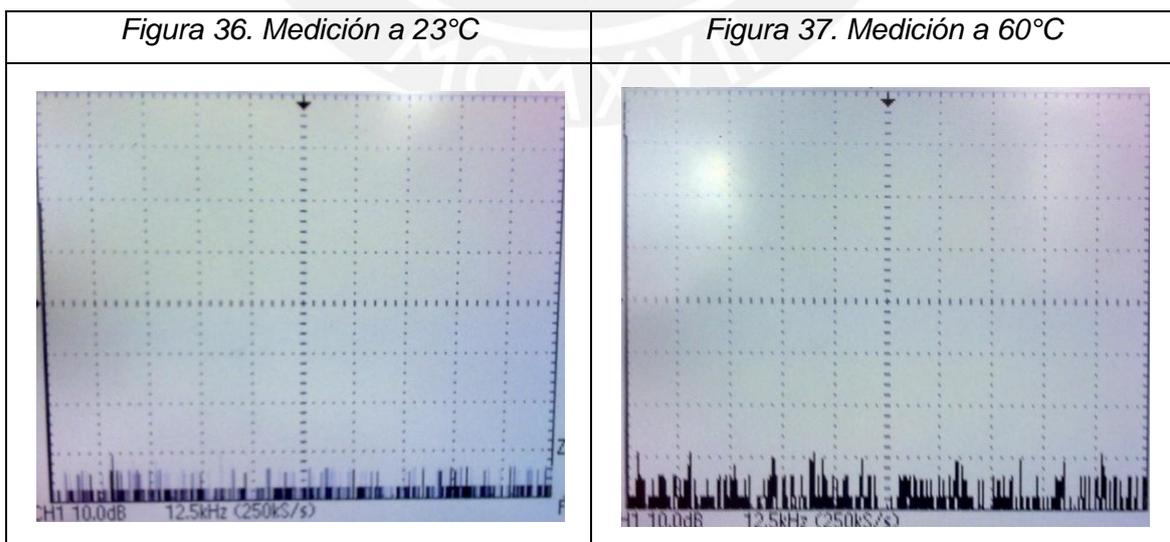
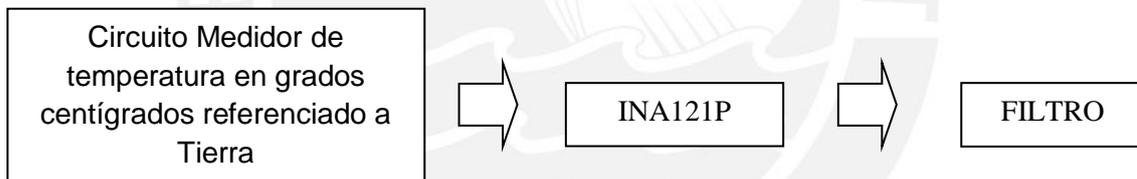
Figura 33. Interior de Baño térmico

4.1 PRUEBAS DE CIRCUITO DE ADAPTACIÓN PARA EL SENSOR DE TEMPERATURA

Las primeras pruebas se realizan solo con el *Circuito Medidor de temperatura en grados centígrados (°C)*, los resultados obtenidos en el Osciloscopio se muestra en las figuras 34 y 35:

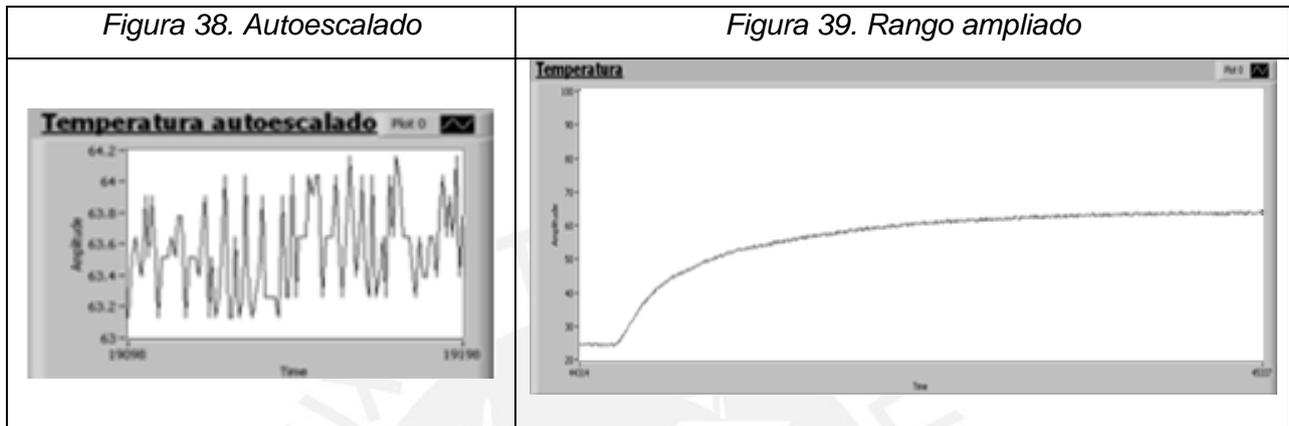


Después se realizaron pruebas con un Amplificador de Instrumentación INA121P y el filtro pasa bajo, los resultados obtenidos en el Osciloscopio se muestra en las figuras 36 y 37:

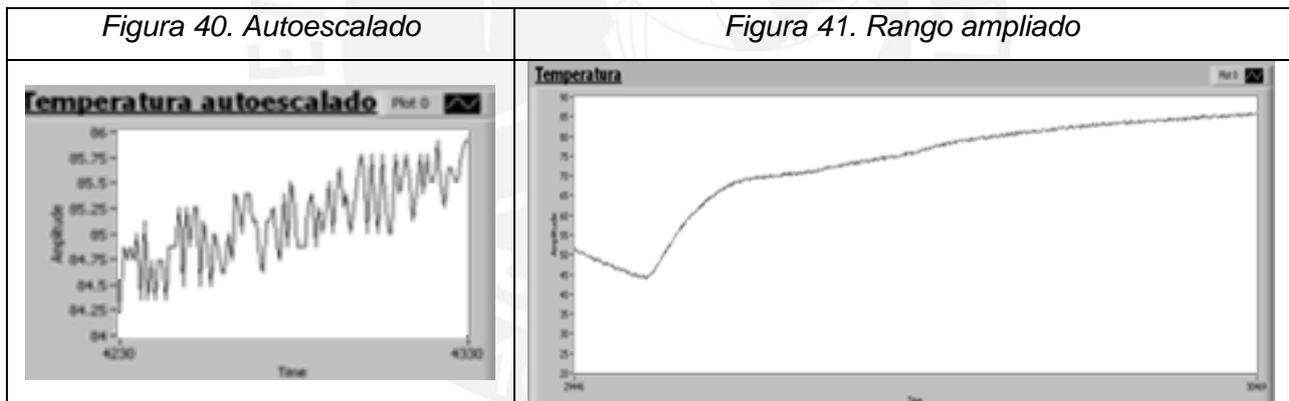


Tal como se puede apreciar en las *figuras 34 y 35*, la reducción del ruido es notable en comparación con el resultado mostrado en las *figuras 36 y 37*. Para realizar pruebas con el DAQ se usó las tarjetas de activación de la resistencia y de la celda Peltier que venía acoplada al baño térmico, así como también del circuito de sensado - ganancia – filtro

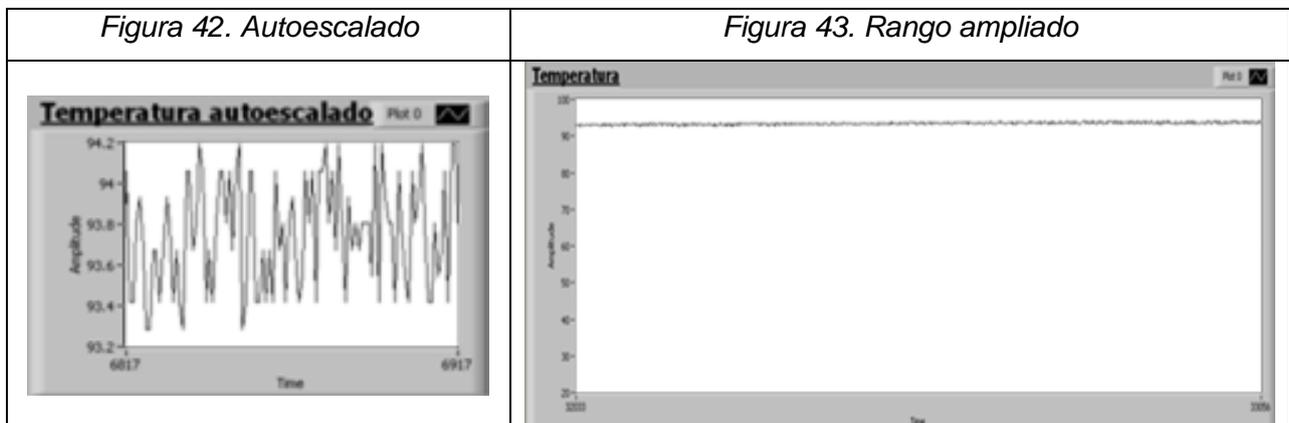
1. Temperaturas altas desde 25°C hasta 63.7°C



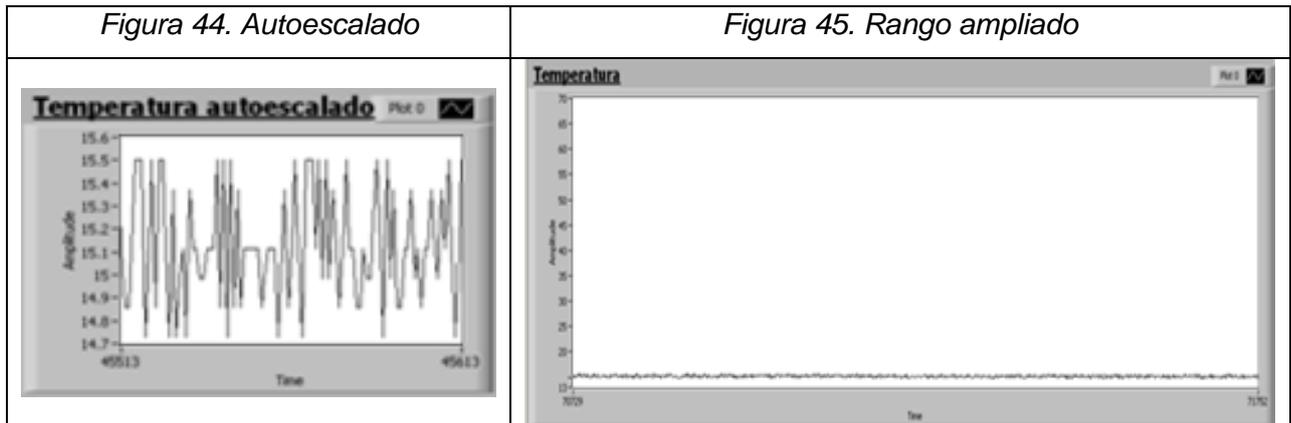
2. Temperaturas altas desde 42°C hasta 85.9°C



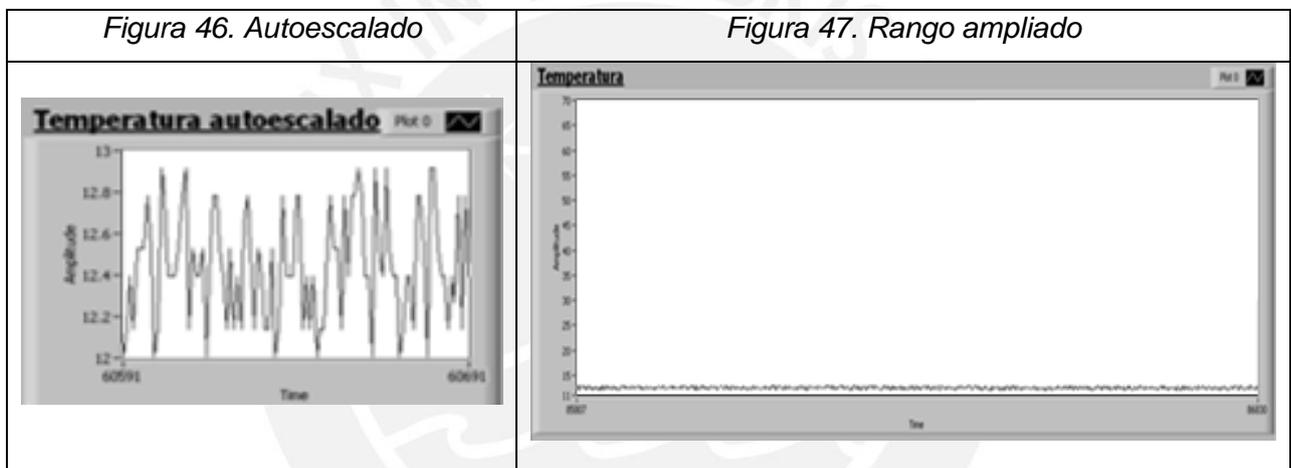
3. Temperaturas altas desde 92.5°C hasta 93.8°C



4. Temperatura baja 15,50°C



5. Temperatura baja 12,39°C



El código realizado para obtener estas muestras se encuentra en el anexo B5.

De las pruebas se obtuvo la siguiente tabla de datos:

Circuito Referenciado en °C (10mV/°C)	LabView °C	LabView Max °C	LabView Min °C
130	12.4	12.8	12.14
132	12.78	13.19	12.4
139	13.42	13.95	13.05
151	14.87	15.28	14.33
154	15.12	15.5	14.71
183	18.21	18.75	17.83
296	30.5	31.05	30.1
872	93.18	93.56	92.79
881	94.08	94.6	93.65

Tabla 6. Resultados de valores en Circuito y software

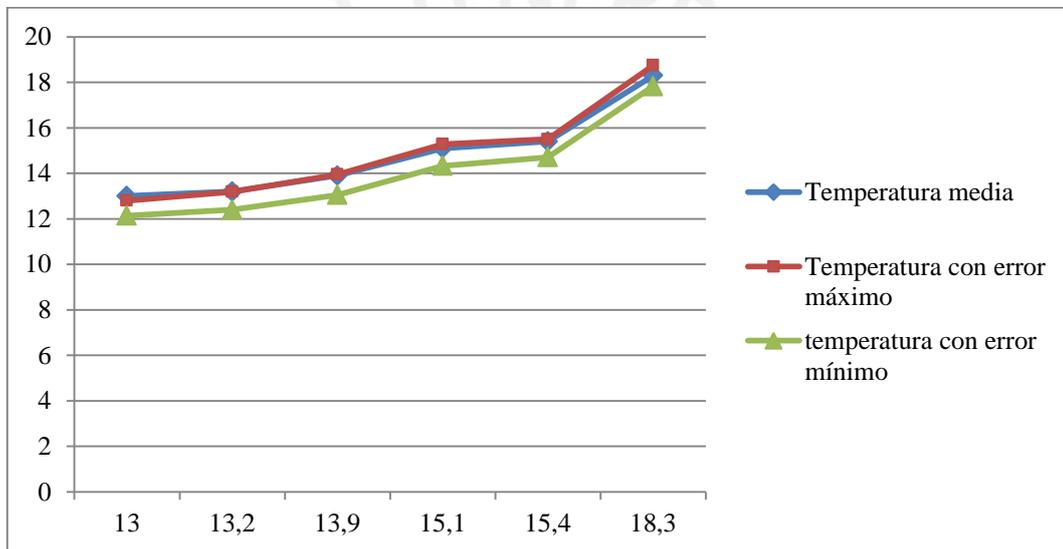


Figura 48. Comparación de valores mínimos y máximos obtenidos en LabView

Temp. Ref. (°C)	Error máximo (°C)	Error mínimo (°C)
13	0.4	0.26
13.2	0.41	0.38
13.9	0.53	0.37
15.1	0.41	0.54
15.4	0.38	0.41
18.3	0.54	0.38
29.6	0.55	0.4
87.2	0.38	0.39
88.1	0.52	0.43

Tabla 7. Errores mínimos y máximos

Como se puede apreciar tanto en la *figura 48* como en la *tabla 7*, los valores de error no exceden los 0.55 °C en el peor caso, puesto que en promedio el error mínimo es 0.395 y en promedio el error máximo es 0.457. Con respecto a la Ganancia obtenida del Amplificador operacional, se determinaron las siguientes razones:

Temp. Ref. (°C)	Ganancia INA121P	Offset
13	9.53846154	0.46153846
13.2	9.68181818	0.31818182
13.9	9.65467626	0.34532374
15.1	9.84768212	0.15231788
15.4	9.81818182	0.18181818
18.3	9.95081967	0.04918033
29.6	10.3040541	-0.30405405
87.2	10.6857798	-0.68577982
88.1	10.6787741	-0.67877412

Tabla 8. Ganancia en INA121P y Offset

Debido a que se está tomando muestras de los valores extremos (Tabla 8.), el offset producido no tendrá un efecto notable sobre la temperatura sensada (rango de diseño 25°C – 45°C), también se comprobó el CMRR del Amplificador de instrumentación de la siguiente manera:

Primero se sometió al INA121P al voltaje diferencial producido por el circuito referenciado a °C, de esto se obtuvo:

$$G_{dif} = \frac{2.065V}{204mV} = 10.12$$

En seguida se sometió a una señal común en las entradas del INA121P y se obtuvo:

$$V = 0.0005$$

Si la diferencia es casi 0 entonces $G_{comun} = 0.0002$. Finalmente, para obtener el CMRR.

$$CMRR = 20Log\left(\frac{G_{dif}}{G_{comun}}\right) dB = 20Log\left(\frac{10.12}{0.0002}\right) dB = 94.08dB.....(Ecuación 27)$$

El CMRR obtenido es muy cercano al valor que ofrece el INA121P en su (100dB). [23]

4.2 PRUEBAS DE CIRCUITO DE CRUCE POR CERO

La siguiente figura 49 se muestra los resultados obtenidos por el simulador de circuitos YENKA electronics, donde se comprueba que la salida del circuito mantiene un voltaje de 0 a 5V ideal para la entrada digital del DAQ.

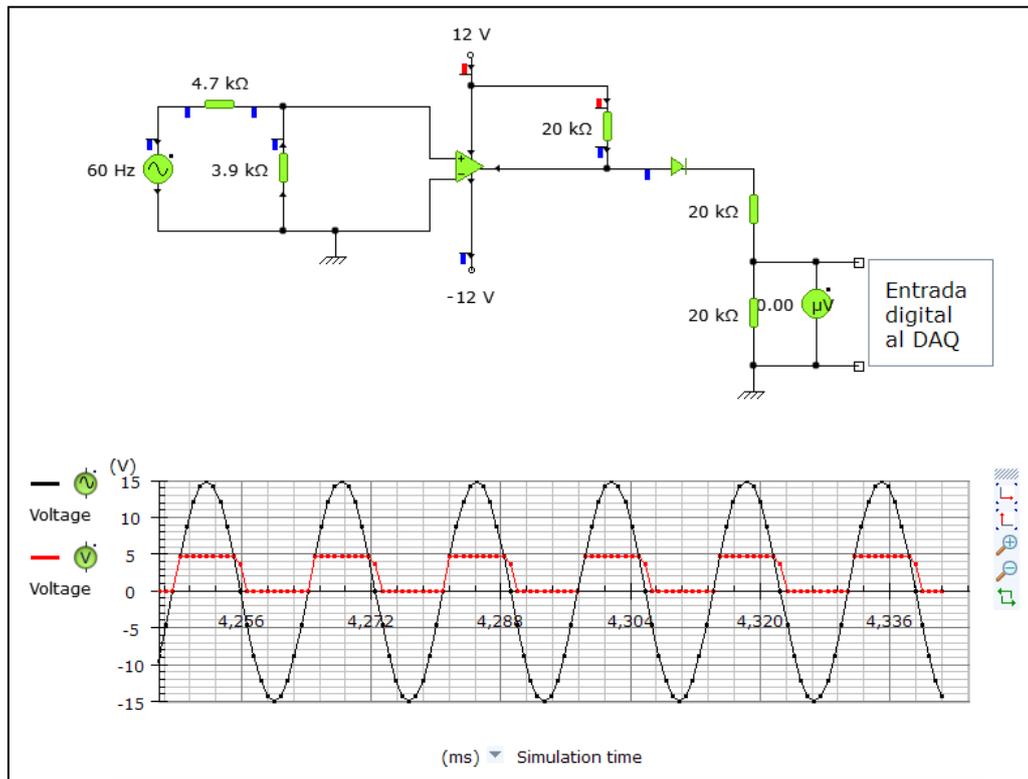


Figura 49. Simulación de Circuito de Cruce por Cero

Tal como se puede apreciar la línea negra es el voltaje de entrada al circuito que va de +15V a -15V y la línea roja pertenece a la salida digital que se transmite a la entrada digital del DAQ, si bien el flanco de bajada mantiene un SlewRate un tanto menor que el de la entrada, es debido a la opamp modelada por el simulador.

Adicionalmente, se implementó en Protoboard el circuito de cruce por cero y se obtuvo los siguientes resultados al ser observada mediante el Osciloscopio (figura 50):

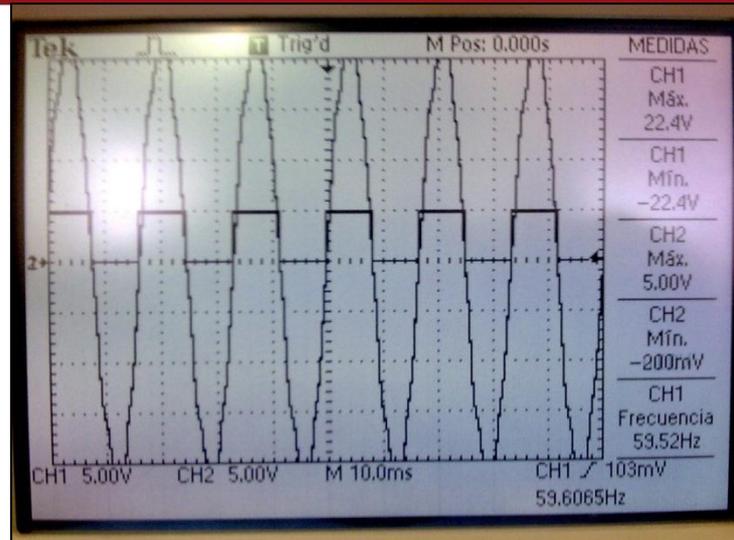


Figura 50. Prueba en Osciloscopio del Circuito de Cruce por Cero Frecuencia = 59.52Hz

En esta prueba se aprecia que el SlewRate es muy alto tanto en el flanco de subida como en el flanco de bajada, esto es adecuado para la entrada del DAQ, ya que de esta manera se obtiene una referencia óptima para el programador en el accionamiento de la resistencia eléctrica además se puede apreciar que la frecuencia varía en un rango de 59.5Hz a 60.1Hz, muy próxima a los 60Hz. En la figura 51 se aprecia la información recibida por la tarjeta de adquisición de datos y mostrada mediante el entorno del programa LabView, El código realizado para obtener esta muestra se encuentra en el anexo B6.

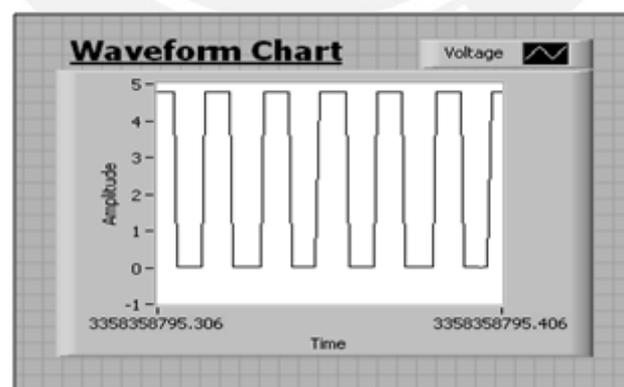


Figura 51. Prueba del circuito con DAQ y LabView

Tal como se puede apreciar en la simulación, se generaron tres gráficas en la parte inferior, la primera simboliza las señales trifásicas que recibe a la salida del transformador, la segunda gráfica es el voltaje rms obtenido a la salida del filtro y la tercera gráfica simboliza el voltaje que se provee sobre una celda Peltier solo en el tiempo que se activo la bobina ubicada a la entrada de las celdas, además se puede apreciar una ligera variación de voltaje la cual se interpreta como una compensación respecto del filtro RC que se forma. En todos los resultados coincide con la propuesta de diseño.



CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado en este documento se puede concluir lo siguiente:

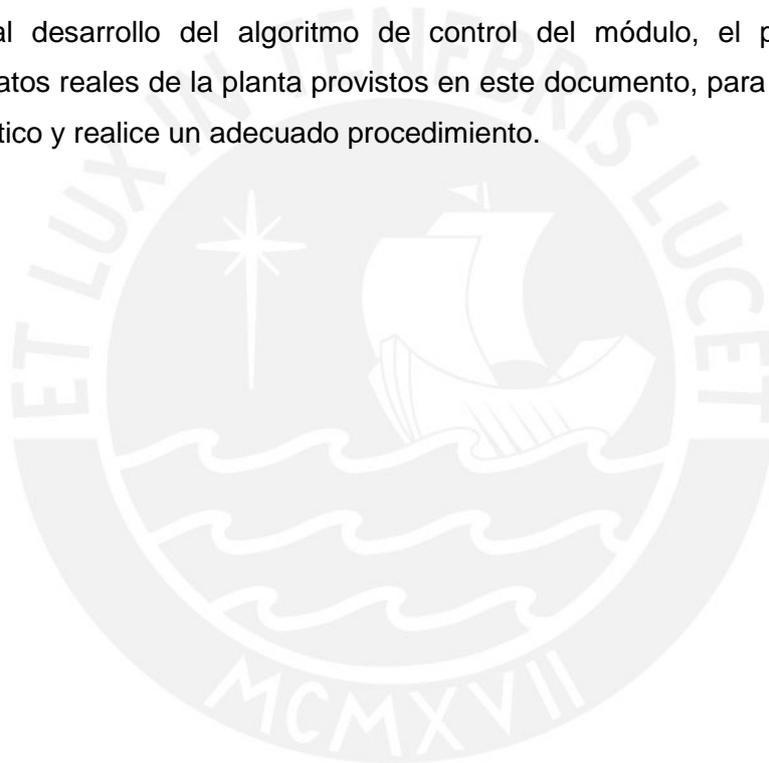
1. El uso de tecnologías térmicas como semiconductores y generadores de calor mediante energía eléctrica se pueden aplicar satisfactoriamente sobre sistemas de control de temperatura en la medida de los requerimientos y recursos que se disponga, siendo estos los más económicamente aptos para lograr un control de temperatura y establecerlo como una herramienta didáctica.
2. De acuerdo al planteamiento de los requerimientos mínimos posibles respetando estándares de construcción y diseño de ingeniería para las distintas disciplinas involucradas y condiciones generales, el módulo de pruebas podrá adaptarse de manera óptima en los laboratorios que cumplan con los requerimientos mínimos de instalación.
3. Es importante resaltar que si se realiza un adecuado tratamiento físico de los dispositivos de sensado de temperatura, es posible adaptarlo al medio que uno desee, teniendo en cuenta los factores de costo, factibilidad y seguridad.
4. Si bien el agitador propuesto es un dispositivo que ayuda en la homogenización de la temperatura, pues no es prescindible ya que por transferencia por convección forzada el fluido recirculará de manera vertical.
5. El uso de la energía eléctrica de manera eficiente también debe ser un punto a ser tomado en cuenta dado que se aprovecha de los recursos con los que cuenta las instalaciones del lugar donde se implementará el sistema, en especial la toma de alimentación trifásica que aporta suficiente energía para realizar el proceso de enfriamiento con las celdas de Peltier.
6. Finalmente, luego de haberse cumplido con los parámetros de diseño y objetivos de la tesis solo queda manifestarse que su construcción no solo servirá como un módulo didáctico para la enseñanza si no también sirva de estudio para futuras mejoras o ampliaciones del sistema.

RECOMENDACIONES

Si bien los circuitos propuestos en su mayoría fueron probados, para el caso de la alimentación de celdas Peltier será necesario considerar factores de protección regulados de acuerdo al Código Nacional de Electricidad – Sección 080 Protección y Control.

Es necesario tener en cuenta la distribución eléctrica que maneja el CETAM (lugar donde se instalará el módulo). Por lo tanto, la persona que implemente el sistema deberá contar con esa información.

Con respecto al desarrollo del algoritmo de control del módulo, el programador deberá considerar los datos reales de la planta provistos en este documento, para que logre obtener el modelo matemático y realice un adecuado procedimiento.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.P. Holman. Transferencia de Calor. New York: McGraw Hill, 8va Edición, 2008, 702 pp.
- [2] Magison, Ernest. Temperature Measurement in Industry. Estados Unidos, 1era Edición, 1990, 165pp.
- [3] Aceda, Jose, Control Avanzado de Procesos: Teoría y Práctica. Madrid, 1era edición, 2002, 573pp.
- [4] San Martín S., César; Torres V., Flavio; Barrientos S., Rodrigo, Monitoreo y Control de Temperatura de un Estanque de Agua entre Chile y España usando Redes de Alta Velocidad, revista Facultad de Ingeniería, Universidad Tarapaca de Arica. (Chile), VOL. 11 N°1, 2003, PP. 41-46
- [5] Curtis D. Johnson, Process Control Instrumentation Technology, Pearson/Prentice Hall, 8va Edición, 2006, 694pp.
- [6] Creús S., Antonio, Simulación y Control de Procesos por Ordenador, Colombia: AlfaOmega, 2da edición, 2007, 506pp.
- [7] Acedo Sánchez, José, "Instrumentación y control básico de procesos". Madrid: Díaz de Santos, 2006, 509pp.
- [8] National Instruments, DAQ USB 6008-6009, (s.f.). Recuperado el 2 de diciembre del 2009 de <http://www.ni.com/pdf/products/us/20043762301101dlr.pdf>
- [9] Process Engineering / Thermal Process Engineering, (s.f.). Recuperado el 15 de abril del 2010, de http://www.gunt.de/static/s52_1.php?p1=&p2=&pN=
- [10] Heat Exchanger Service Module –TecQuipment, (s.f.). Recuperado el 12 de diciembre del 2010, de http://www.tecquipment.com/Thermodynamics/Heat_Transfer/TD360.aspx
- [11] Fundamentos del control automático industrial, (s.f.). Recuperado el 20 de enero del 2010, de http://www.sapiensman.com/control_automatico/controlautomatico.htm
- [12] Sobrado, Eddie (Compilador), Curso de Controladores Lógicos Programables, 2009
- [13] LM135A/LM235A/LM335A - Precision Temperature Sensors Datasheet National Semiconductor, (s.f.).recuperado el 30 de mayo del 2010 de <http://www.ti.com/product/lm135a>

- [14] Application Notes for Peltier, V-INFINITY, (s.f.).recuperado el 10 de febrero del 2010 de http://products.cui.com/CUI_CP30138_Application_Notes.pdf?fileID=1489
- [15] McCabe, Smith y Harriott, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. España: McGraw-Hill, 4ta edición, 2001, 1121p.
- [16] Biasioli y C. S. de Weitz, Química General e Inorgánica. Kapelusz, 2da Edición, 1981.
- [17] Harvey, John F, Theory and Design of Pressure Vessels. Van Nostrand Reinhold, 2da Edición, 1991, 623pp.
- [18] Manual Técnico de Pegado, Plastiglas de México, (s.f.). Recuperado el 15 de mayo del 2010, http://www.plastiglas.com.mx/images/content/PLASTIGLAS_INST/uploads/1167952791058Impacta.pdf
- [19] Design of RLC Band Pass Filters, Ing. Thomas Buch, University of Rostock Institute of Communications Engineering, (s.f.). Recuperado el 10 de marzo de 2010 de http://www.euitt.upm.es/uploaded/519/bandfilter_script.pdf
- [20] Informe Final del Proyecto electrónico 1 - Grupo 3.Curso Proyecto Electrónico 1, 2009, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Ingeniería Electrónica – PUCP
- [21] BTA20 0.8 A Three-Quadrant Triacs High Commutation, Phillips Semiconductor. (s.f.). Recuperado el 13 de marzo de 2010 de <http://www.datasheetarchive.com/BTA20-datasheet.html>
- [22] Rashid, Muhamad. Electrónica de Potencia.Pearson Education, 3ra edición, 2008, 878pp.
- [23] TexasInstrumentsINA121P. (s.f.).recuperado el 9 de marzo del 2010, Datasheet<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/6/0ri77zo95uco02xwli8qzh92g23y.pdf>
- [24] Software, R-Theta Thermal Solutions Inc., recuperado el 23 de mayo del 2010 de<http://www.r-tools.com/>
- [25] The International Standard of Automation (ISA), ANSI/ISA - 5.1 – 2009, Instrumentation Symbols and Identification, apr.2009.