

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO ELECTRÓNICO DEL CONTROL DE TEMPERATURA
DE UNA CÁMARA ADIABÁTICA PARA SIMULACIÓN DE
ENVEJECIMIENTO TÉRMICO**

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

José Miguel Pérez Flores

ASESOR: Ing. Willy Eduardo Carrera Soria

Lima, Agosto del 2011

RESUMEN

La ingeniería contribuye a la mejora de la calidad de vida de las personas debido a que siempre se encuentra en la búsqueda de la forma de más eficiente de resolver un problema o atender alguna necesidad que se le plantea. En ese sentido, el objetivo del presente estudio es atender a la necesidad de contar con un control de temperatura para la cámara adiabática del laboratorio de energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en la cual se piensa realizar ensayos de envejecimiento térmico, para lo cual se presenta el diseño electrónico de dicho control.

Para realizar el diseño lo primero que se hizo fue solicitar los requerimientos sobre el rango de temperatura y el funcionamiento que debería tener el sistema a diseñar. Luego de lo cual se inició el estudio de las características de la cámara y definir con qué elementos se contaba para poder controlar la temperatura dentro de la misma. Así entonces se diseñaron las etapas y los elementos que intervendrían en ellas, tales como la etapa de sensado y acondicionamiento de señal, el diseño del circuito de control de potencia de resistencias calefactoras para la etapa de calentamiento y de los circuitos de control de la válvula de expansión y de encendido del compresor para la etapa de enfriamiento.

Con la finalidad de verificar el funcionamiento correcto del diseño presentado, se implementaron los circuitos para determinar si cumplían con controlar cada etapa para las cuales fueron diseñados. Se comprobó el funcionamiento correcto de cada circuito a la vez que se analizó el comportamiento de la planta, que en este caso es la cámara. El análisis de los datos obtenidos al trabajar en las etapas de calentamiento y enfriamiento utilizando las resistencias calefactoras y el sistema de refrigeración respectivamente, permitió que se decida el uso de un control todo o nada para lograr controlar la temperatura.

Los resultados obtenidos permitieron concluir que el diseño presentado en esta tesis permite controlar la temperatura al interior de la cámara dentro del rango establecido de -20°C y 80°C , con un error de 1.1°C .

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1: Problemática actual en la realización de ensayos de envejecimiento térmico.	2
1.1. Definición del proceso de envejecimiento térmico	2
1.1.1. Envejecimiento térmico acelerado	3
1.2. Importancia y aplicaciones de los ensayos de envejecimiento térmico	3
1.3. Desarrollo de ensayos de envejecimiento térmico en el Perú	5
1.4. Problemática actual en el Perú	5
Capítulo 2: Tecnología y proceso de ensayos de envejecimiento térmico.	7
2.1. Estado del arte	7
2.1.1. Principios de termodinámica	7
2.1.2. Transferencia de calor	8
2.1.3. Refrigeración	8
2.1.3.1. Refrigeración por compresión de vapor	8
2.1.3.2. Diagrama de Mollier	9
2.1.4. Tipos de sistemas de control	9
2.1.5. Elementos utilizados para el sistema de control de temperatura	11
2.1.5.1. Sensores de temperatura	11
2.1.5.2. Válvula de expansión	12
2.1.5.3. Resistencias calefactoras	13
2.1.5.4. Tipos de microcontroladores	13
2.2. Tipos de cámaras para ensayos térmicos	14
2.3. Cámara adiabática del laboratorio de energía	17
2.4. Equipo de refrigeración del laboratorio de energía	18
Capítulo 3: Diseño electrónico del control de temperatura de la cámara adiabática.	19
3.1. Objetivos	19
3.1.1. Objetivos generales	19
3.1.2. Objetivos específicos	19
3.2. Diagrama de bloques	20
3.3. Requerimientos generales del sistema	21

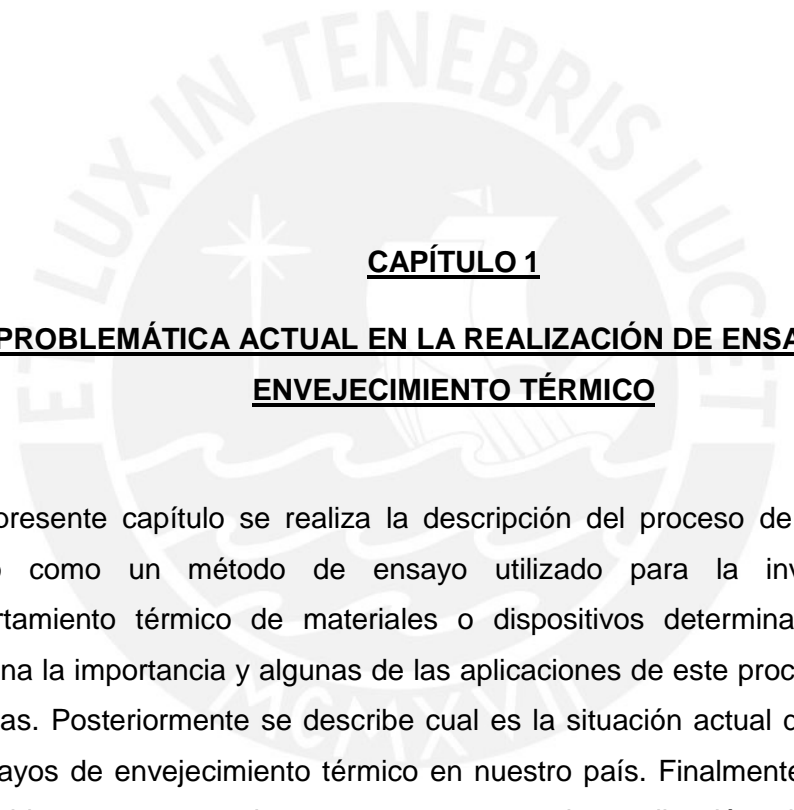
3.4.	Diseño del Hardware del sistema	22
3.4.1.	Diseño de la tarjeta de control principal	22
3.4.2.	Diseño del módulo de sensado y acondicionamiento de señal	25
3.4.3.	Diseño del módulo de control de potencia de las resistencias	27
3.4.4.	Diseño del módulo de control de apertura de la válvula	29
3.4.5.	Diseño del módulo de encendido y apagado del compresor	30
3.4.6.	Diseño de la tarjeta de alimentación	31
3.5.	Diagrama de conexiones	32
3.6.	Diseño del software del sistema	33
3.6.1.	Diseño del programa principal	33
3.6.2.	Diseño de subrutinas	34
3.6.3.	Diseño de interrupciones	36
3.7.	Error del sistema	37
Capítulo 4: Evaluación de costos y resultados del diseño presentado.		38
4.1.	Pruebas y resultados del sistema diseñado	38
4.1.1	Pruebas y resultados con la etapa de sensado y acondicionamiento de señal	38
4.1.2.	Pruebas y resultados con las resistencias	41
4.1.3.	Pruebas y resultados con la válvula de expansión	43
4.2.	Selección del tipo de control	46
4.3.	Resultados finales	46
4.4.	Evaluación de costos	51
Conclusiones		52
Recomendaciones		53
Bibliografía		54
Anexos		

INTRODUCCIÓN

El progreso de un país va de la mano con el desarrollo de sus industrias y por la calidad de los productos que las diversas industrias ofrecen, en ese sentido es importante contar con equipos que permitan realizar estudios sobre las características de productos, materiales o dispositivos a fabricar. Esto permite que nuestras industrias tengan posibilidades de competir de una mejor manera no solo a nivel regional sino también a nivel mundial. La tecnología para lograr ello, muchas veces es importada debido a que los equipos requeridos no necesariamente se fabrican aquí o si se fabrican no tienen las prestaciones que ofrecen los equipos fabricados en otros países.

Uno de los diversos ensayos que se realizan en diferentes industrias para determinar la calidad de un material o producto, es el ensayo de envejecimiento térmico. Este ensayo requiere del uso de una cámara climática o térmica para poder llevar la temperatura del material a un valor deseado y dejarlo así por horas, luego de lo cual se analiza cómo han cambiado sus propiedades.

En el contexto mencionado la presente tesis busca contribuir al desarrollo de este tipo de equipos, motivo por el cual en el presente estudio se presenta el diseño electrónico del control de temperatura de una cámara adiabática que sirva para una posterior implementación del mismo en la cámara adiabática que se encuentra en el laboratorio de energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú, la cual carece de un control que pueda aprovechar dicha cámara para realizar ensayos de envejecimiento térmico.



CAPÍTULO 1

PROBLEMÁTICA ACTUAL EN LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE
ENVEJECIMIENTO TÉRMICO

En el presente capítulo se realiza la descripción del proceso de envejecimiento térmico como un método de ensayo utilizado para la investigación del comportamiento térmico de materiales o dispositivos determinados. Luego se menciona la importancia y algunas de las aplicaciones de este proceso en diversas industrias. Posteriormente se describe cual es la situación actual de la realización de ensayos de envejecimiento térmico en nuestro país. Finalmente se mencionan los problemas encontrados con respecto a la realización de ensayos de envejecimiento térmico en el Perú, lo cual nos da un panorama de las necesidades que requieren ser atendidas en este contexto y que forman parte del objeto de estudio de la presente tesis.

1.1. Definición del proceso de envejecimiento térmico

Frecuentemente la vida útil de un material o dispositivo está influenciada por diversos factores ambientales siendo la temperatura uno de los más importantes. Uno de los resultados de la acción de la temperatura sobre determinado material es la descomposición o modificación del material en tal extensión, lo cual implica la

posibilidad de que ya no cumpla adecuadamente la función prevista para la que fue creado dicho material. El proceso de envejecimiento térmico consiste en el proceso de degradación, cambio en las propiedades y características de materiales o funcionamiento de dispositivos a lo largo de su vida útil, producto del sometimiento a determinadas temperaturas, que por lo general son las temperaturas de trabajo bajo las cuales debe funcionar el material o dispositivo. Estas temperaturas son variantes en el tiempo a lo largo de los ciclos regulares de trabajo durante el cual es utilizado un material o dispositivo determinado [6].

1.1.1. Envejecimiento térmico acelerado

Cuando se fabrican materiales o dispositivos cuya vida útil será de varios años, el estudio de los efectos del envejecimiento térmico sobre ellos implicaría una inversión de mucho tiempo y dinero si únicamente se esperara a que cumplan su ciclo de vida útil para ver los resultados. Se invertiría mucho tiempo pues el fabricante tendría que esperar a que el producto ya terminado sea evaluado durante toda su vida útil y que luego de ello, basado en los resultados de la evaluación, se tenga que hacer las modificaciones necesarias en el material o en el diseño en caso de encontrar imperfecciones en los mismos, en consecuencia se tendría que invertir más tiempo y al no obtener aún el producto en su estado final con la calidad que se desea para su venta o consumo, el fabricante no percibirá ingresos económicos por dicho producto. Este inconveniente es resuelto mediante el uso de cámaras climáticas, térmicas o el uso de hornos de laboratorio. En los equipos mencionados se pueden llevar a cabo ensayos de envejecimiento térmico acelerado, el cual consiste en tratar de obtener información respecto al comportamiento que tendría el material o dispositivo expuesto a los efectos de la temperatura ambiente o de trabajo, pero bajo condiciones controladas. Con ello se consigue ahorrar tiempo en el estudio y control de calidad de los materiales o dispositivos a fabricar en masa, lo cual a su vez implica un impacto económico positivo para las industrias que realizan este tipo de ensayos dentro de su proceso de investigación o control de calidad [11].

1.2. Importancia y aplicaciones de los ensayos de envejecimiento térmico

En la actividad empresarial y en toda industria en general, el factor calidad es uno de los más importantes en lo que a la búsqueda de diferenciación se refiere. La calidad de un producto se refiere a las características propias que posee este y que lo harán diferente a los productos de otras empresas e incluye aspectos tales como el diseño, la confiabilidad del mismo y el servicio que presta durante su vida útil. En

tal sentido el poder determinar las características de un producto y cómo varían estas debido a su uso y a las condiciones de trabajo a las cuales son sometidas, es vital durante la fase de diseño e incluso después de esta etapa para lograr una mejora continua del producto.

Los ensayos de laboratorio son herramientas que permiten al fabricante realizar estudios particulares sobre alguna o varias características de determinado material, dispositivo o sistema; dentro de los diversos tipos de ensayos que se le pueden realizar a un producto está el de envejecimiento térmico. Este tipo de ensayo es importante pues permite determinar la variación de las características de un producto debido a la acción de la temperatura, es decir, nos permite determinar si los productos son capaces de cumplir con los requerimientos bajo los cuales fueron fabricados, o si estos se ven afectados por las temperaturas dentro de las cuales tiene que funcionar dicho producto. Este ensayo también permite determinar el tiempo de vida útil de un material o sistema bajo determinado rango de temperaturas antes de que empiece a presentar fallas en su funcionamiento lo cual es importante determinar debido a que puede poner en riesgo el desarrollo del proceso dentro del cual es utilizado y sobre todo la integridad de los operarios involucrados en el proceso.

Las aplicaciones de los ensayos de envejecimiento térmico son variadas debido a que son empleadas por diversos tipos de industrias, las cuales buscan asegurar el correcto funcionamiento del material o dispositivo dentro de su periodo de vida útil. Podemos mencionar su aplicación en estudios de materiales o dispositivos empleados en aeronáutica, tecnología aeroespacial, construcción, productos farmacéuticos, automatismos eléctricos y electrónicos, recubrimientos, química industrial, industria maderera, industria de plásticos, cosmética y alimentación. Los parámetros de los ensayos y la normativa de los mismos varían en función al material o dispositivo que va a ser sometido a estudio.

En el caso de la industria de los plásticos el ensayo de envejecimiento térmico se realiza para evaluar la degradación térmica del material plástico, donde se somete dicho material a temperatura constante durante un tiempo determinado y se va evaluando sus propiedades mecánicas (elongación, tensión de rotura, etc.), peso molecular, tiempo de fragilización y aspecto visual [7]. Otro caso de la aplicación de este ensayo es el que se le realiza al aislamiento de los cables eléctricos, donde se selecciona una muestra y de ella se preparan una serie de ejemplares, de los cuales la mitad se someten al ensayo y la otra mitad debe mantener las

propiedades físicas originales. Luego se realiza la determinación de las propiedades de todas las muestras. El tiempo de ensayo y el nivel de temperatura de envejecimiento de cada tipo de material se especifican en la norma correspondiente a cada producto, [6].

1.3. Desarrollo de ensayos de envejecimiento térmico en el Perú

En el Perú este tipo de ensayos es realizado en parte dentro de las propias fábricas que cuentan con cámaras climáticas o con estufas dentro de sus instalaciones y en las cuales se desarrollan los ensayos como parte del proceso de control de calidad o desarrollo de sus productos. Estas fábricas pertenecen por lo general a grandes empresas que pueden invertir en laboratorios y equipos para su uso privado. La otra parte de los ensayos que se realizan en el Perú es en laboratorios particulares que ofrecen la realización de ensayos de envejecimiento térmico como uno de sus servicios. En estos laboratorios a diferencia de los primeros acuden las medianas y pequeñas empresas cuya economía aún no le permite invertir en una cámara climática, un horno o una estufa para poder realizar los ensayos de envejecimiento térmico por cuenta propia. Lo cual también implica que cuenten con personal especializado en el desarrollo de estos ensayos.

Un ejemplo claro de un laboratorio en el Perú que realiza diversos tipos de ensayos como servicios a terceros es el laboratorio del CITEccal (Centro de innovación tecnológica del cuero, calzado e industrias conexas), el cual tiene como uno de sus servicios la determinación de envejecimiento térmico acelerado (incluye resistencia a la tracción y porcentaje de elongación) y cuyas tarifas varían dependiendo del tiempo que dure el ensayo (pueden ser de 64.82, 80.79 u 84.51 nuevos soles por 24, 48 horas o 7 días de ensayo respectivamente) [4]. Otro ejemplo de este tipo de laboratorios en Perú es la empresa Laboratorios Analíticos J y R S.A.C. que cuenta con una estufa para poder llevar a cabo este tipo de ensayos. Kossodo S.A.C es otra empresa en el Perú que brinda este servicio mediante el uso de una cámara climática.

1.4. Problemática actual en el Perú

En nuestro país un sector muy importante de la economía es el conformado por la pequeña y mediana empresa, la cual por lo general no cuenta ni con la infraestructura ni el equipamiento con el que cuentan las grandes empresas y fábricas existentes en nuestro medio. Ello conlleva a que se vean limitados en la realización de ensayos y pruebas de sus productos para así evaluar la calidad de

los mismos. En ese contexto dicho sector opta por contratar los servicios de laboratorios especializados en la realización de los diversos tipos de ensayos que estas empresas requieren, uno de esos ensayos es el de envejecimiento térmico. Al desarrollar el presente estudio se detectó que es difícil encontrar en nuestro país laboratorios particulares especializados en brindar el ensayo de envejecimiento térmico como una de sus servicios a terceros. Lo cual no quiere decir que no existan tales laboratorios pero si son pocos, líneas arriba se ha mencionado algunos de ellos.

Esta escasez de lugares en los cuales realizar los ensayos de envejecimiento térmico puede ser solucionada con la compra de una cámara climática, de un horno o una estufa, pues en dichos equipos se puede programar la temperatura deseada y los parámetros de tiempo para la realización de las pruebas, pero debemos tener en cuenta que las pequeñas y medianas empresas no necesariamente cuentan con el presupuesto necesario para la compra de estos equipos cuyo costo no es bajo.

Una posible solución a esta problemática es el desarrollo de equipos a bajo costo para el desarrollo de ensayos de envejecimiento térmico, los cuales deben prestar la misma confiabilidad que los equipos ya existentes en el mercado y que son costosos. La presente tesis busca contribuir al desarrollo de este tipo de equipos confiables y de bajo costo, elaborando así un diseño en particular que pueda ser implementado en una cámara adiabática con la que cuenta el laboratorio de energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú y así permitir que existan más posibilidades para aquellas empresas que deseen realizar este tipo de ensayos a sus productos.

CAPITULO 2

TECNOLOGÍA Y PROCESO DE ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO TÉRMICO

Al iniciar este capítulo se mencionan los aspectos teóricos implicados en el desarrollo de la presente tesis y cuya comprensión conllevaron a la consecución de los objetivos de la misma. Seguidamente se hace mención de los equipos existentes en la actualidad para la realización de los ensayos de envejecimiento térmico. Luego se detallan las características de la cámara adiabática ubicada en el laboratorio de energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú y para finalizar se hace la descripción del sistema de refrigeración interconectado con la cámara en mención.

2.1. Estado del arte

2.1.1. Principios de la termodinámica

La termodinámica es una rama de la Física que estudia las transformaciones de la energía y las transferencias de ésta, en especial, las interrelaciones entre el trabajo, el calor y la temperatura. Existen dos leyes que la rigen y las cuales nos ayudan a entenderla y en base a ello aplicarla en el diseño y cálculo de máquinas o procesos termodinámicos que son utilizados en la solución de muchos problemas prácticos, como es el caso del diseño desarrollado en la presente tesis. Dichas leyes son las que se mencionan a continuación:

Primera ley de la Termodinámica: Esta primera ley es una generalización del principio de conservación de la energía y define que el cambio en la energía interna de un sistema es igual a la suma de la energía transferida al sistema como calor y trabajo. [19]

Segunda ley de la Termodinámica: Esta ley es enunciada de la siguiente manera por el físico-matemático alemán Rudolf Clausius: *“Es imposible que una máquina actuando por sí sola y sin ayuda de un agente exterior, transporte calor de un cuerpo a otro que tenga mayor temperatura que el primero.”* [9].

2.1.2. Transferencia de calor

Es la transferencia de energía que se da debido a una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos. Se definen las unidades del calor con base en el cambio de temperatura de un material específico, en ese sentido se define a la caloría (cal) como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14.5°C a 15.5°C. Debido a que el calor es un tipo de energía se le relaciona con la energía mecánica de la siguiente manera: 1 caloría equivale a 4.186 Joules [19].

2.1.3. Refrigeración

La refrigeración es conocida comúnmente como un proceso de enfriamiento y consiste en la remoción de calor de una sustancia para llevar o mantener su temperatura a un nivel inferior a la temperatura ambiental. La refrigeración tiene aplicación en diversos campos o sectores como en el doméstico, industrial y comercial. Existen diversos métodos de refrigeración como el de la refrigeración termoeléctrica, la de chorro a vapor, por ciclo de aire y la refrigeración por compresión de vapor.

2.1.3.1. Refrigeración por compresión de vapor

Es uno de los métodos más usados para producir refrigeración mecánica. Consiste en un sistema que cuenta con un refrigerante líquido volátil que al evaporarse, en una parte del sistema llamada evaporador, origina la remoción de calor de la sustancia a la cual se quiere enfriar. Para lograr ello el sistema también debe contar con un compresor y un condensador con la finalidad de mantener el proceso de refrigeración reutilizando el refrigerante y haciendo de esto un proceso cíclico.

2.1.3.2. Diagrama de Mollier

Es el diagrama con mayor utilidad y el que se usa con mayor frecuencia para la realización de cálculos en refrigeración, se le conoce también como diagrama de presión – entalpía. Se le denomina así porque las propiedades de presión y entalpía se muestran en los ejes vertical y horizontal respectivamente, pero además nos muestra las líneas de saturación, las regiones de líquido y vapor del refrigerante, líneas de temperatura constante, de volumen constante, de entropía constante. Además algunos diagramas muestran la calidad, es decir, el porcentaje de masa de vapor en una mezcla de líquido y vapor.

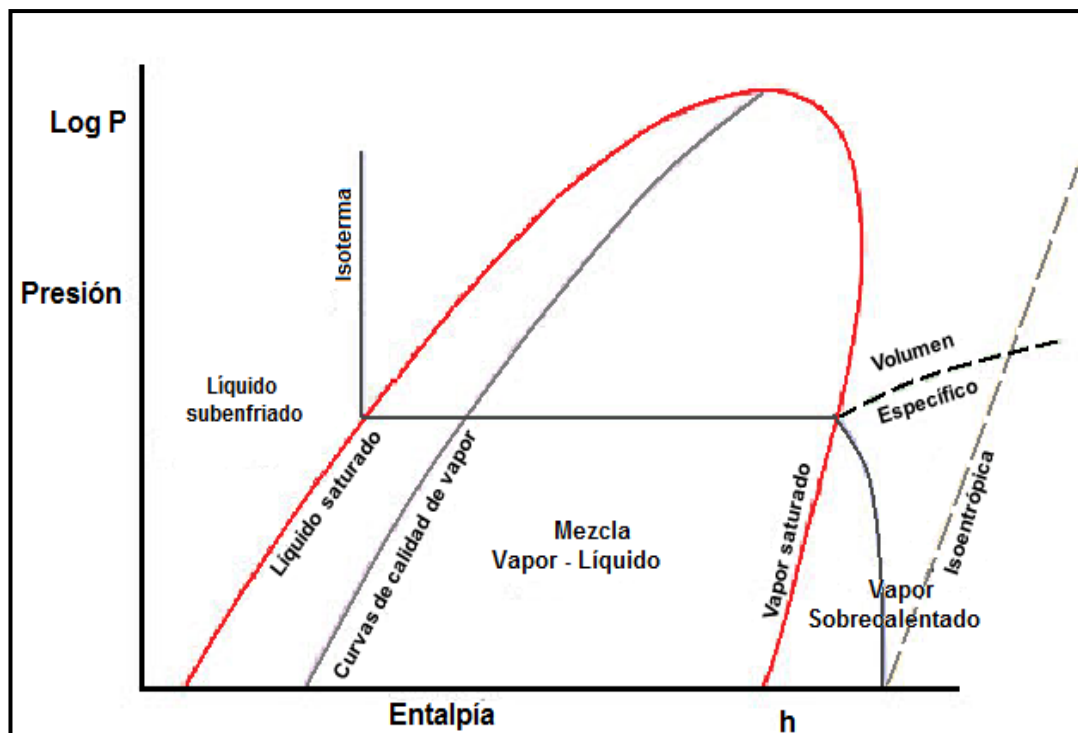


Figura. 2.1 Diagrama Presión – Entalpía

Los procesos implican cambios en las condiciones del refrigerante, que tienen lugar al fluir este a través del equipo. El diagrama de presión – entalpía (mostrado en la figura 2.1) nos permite mostrar los procesos y por consiguiente los cambios en los valores de las propiedades del refrigerante lo cual es importante pues nos ayuda a comprender mejor cómo funciona el sistema de refrigeración por compresión de vapor y con ello analizar los problemas de operación del mismo. [17]

2.1.4. Tipos de sistemas de control

La finalidad de elaborar el diseño de cualquier equipo o sistema es que este cumpla con requerimientos definidos, en ese sentido es importante conocer las diversas

estrategias o tipos de control. El sistema de control a elegir nos permitirá monitorear la variable física de nuestro interés que en nuestro caso es la temperatura, este monitoreo sirve para detectar desviaciones en la salida deseada y a partir de ello tomar decisiones automáticas destinadas a su corrección.

El presente estudio contempla el desarrollo de un control de lazo cerrado pues se pretende medir la temperatura dentro de una cámara adiabática con la finalidad de controlar resistencias calefactoras y una válvula de expansión electrónica para elevar o disminuir respectivamente dicha temperatura, obteniendo así un valor de temperatura deseado.

Control proporcional: En este tipo de control el controlador genera una señal a su salida que es proporcional a la señal de error. Cuanto más grande es la ganancia de controlador mayor es la señal de control generada para un mismo valor de señal de error. Por lo tanto este tipo de control permite reducir el error en estado estacionario pero cabe mencionar que no permite eliminar dicho error en estado estacionario pues es necesario que exista un elemento integrador dentro del sistema [3].

Control proporcional – derivativo: Es la suma de las acciones proporcional y derivativa. En el control derivativo la señal de control es proporcional a la derivada de la señal de error, logrando así conocer las características dinámicas de la misma y producir una corrección antes que la señal de error se incremente. El control derivativo no puede ser utilizado de manera independiente pues no puede responder a una señal de error constante. El control proporcional – derivativo proporciona al sistema una respuesta transitoria con menor sobreimpulso, pero cuando la influencia del control proporcional derivativo es muy grande el sistema de control tiende a ofrecer una respuesta demasiado lenta [3]. Su función de transferencia es la siguiente:

$$G(S) = Kp(1 + Td.S)$$

Control proporcional – integral: Este tipo de control genera una señal que resulta de la combinación de la acción proporcional e integral conjuntamente, es decir combina las ventajas de ambos tipos de control. La acción integral elimina el error estacionario mientras que la acción proporcional reduce el riesgo de inestabilidad que añade la introducción de la acción integral [3]. Su función de transferencia es la siguiente:

$$G(S) = Kp(1 + \frac{1}{Ti.S})$$

Control proporcional – integral – derivativo: Este tipo de control reúne las mejores características de los controles proporcional, integral y derivativo. Esta combinación de acciones permite eliminar el error en estado estacionario, es decir, la diferencia entre la salida y la entrada será cero conforme el tiempo tiende a infinito. Además de ello también permite obtener una respuesta transitoria (aquella que va del estado inicial al final) con tiempos de establecimiento y de máximo sobreimpulso pequeños [3], [16]. La función de transferencia de este tipo de control es la siguiente:

$$G(S) = Kp(1 + \frac{1}{Ti.S} + Td.S)$$

2.1.5. Elementos utilizados para el sistema de control de temperatura

2.1.5.1 Sensores de temperatura

Para poder llevar a cabo el control de un parámetro es necesario poder medirlo correctamente, por ello es necesario conocer las características de los diversos tipos de sensores. En tal caso, para efectos de la presente tesis es relevante centrarse en los sensores de temperatura y sus características. Estos sensores pueden clasificarse según su principio de funcionamiento en: Mecánicos, eléctricos y termoelectrónicos.

Por efectos mecánicos:

Termómetros de líquido en vidrio: Consiste en un tubo capilar sobre un bulbo conteniendo mercurio, que al ser calentado produce un cambio en el volumen del mercurio que lo fuerza a subir por el tubo capilar, la altura de la columna es utilizada para indicar la temperatura del fluido que rodea el bulbo con una escala apropiada [8].

Termómetro bimetalico: Se basa en los coeficientes de dilatación termal de dos láminas de metal fusionadas formando una tira bimetalica, en la cual al ser calentada se produce una deflexión. La temperatura se indica mediante el uso de una bobina helicoidal conectada a un dispositivo mecánico indicador [8].

Por efectos eléctricos:

Termistores: Estos sensores están basados en materiales semiconductores, con forma de perla o disco. Además se caracterizan por su alta resistividad y su elevado

coeficiente de temperatura. La medición con este tipo de sensor se obtiene al relacionarla con la resistencia del dispositivo, son sensores empleados en aplicaciones que no requieran gran exactitud [8].

Por efecto termoeléctrico:

Termocuplas: Son sensores que generan una tensión en función a la temperatura a la cual son sometidos, sin necesidad de ser alimentados. Se basa en el efecto descubierto por el físico alemán Seebeck en el que un circuito formado por la unión de dos metales distintos con dos uniones a diferentes temperaturas origina una corriente eléctrica en dicho circuito. Si el circuito se abre aparecerá una tensión que será función de la diferencia de temperaturas entre las uniones. En este dispositivo pueden utilizarse diferentes pares de materiales según su rango de aplicación [8]. La figura 2.2 muestra los rangos a los que trabajan distintos tipos de termocuplas.

Termocupla	Rango	Clase 1 . Desviación máxima (±) (1)
Cobre vs. Cobre-níquel, Tipo T	-40 a + 350°C	0,5 °C ó 0,004 (t)
Hierro vs. cobre- níquel, Tipo J	-40a+ 750 °C	1,5 °C ó 0,004 (t)
Níquel-cromo vs. níquel, Tipo K	- 40 a 1.000 °C	1,5 °C ó 0,004 (t)
Platino-rodio 13% vs. platino, Tipo R .	0 a + 1.600°C	1 °C ó 1 + 0,003 (t - 1. 100)°C
Platino-rodio 10% vs. platino, Tipo S	0 a + 1. 600°C	1 °C ó 1 + 0,003 (t - 1.100)°C
Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6%, Tipo B	--	--
Termocupla	Rango	Clase 2 . Desviación máxima (±) (1)
Cobre vs. cobre-níquel, Tipo T	-40a+ 350°C	1°C ó 0,0075(t)
Hierro vs. cobre-níquel, Tipo J	-40a+ 750 °C	2,5 °C ó 0,0075 (t)
Níquel-cromo vs. níquel, Tipo K	- 40 a + 1.200°C	2. 5 °C ó 0.0075 (t)
Platino-rodio 13% vs. platino, Tipo R	0 a + 1.600 °C	1,5 °C ó 0,0025 (t)
Platino- rodio 10% vs. platino, Tipo S	0 a + 1.600 °C	1,5 °C ó 0,0025 (t)
Platino- rodio 30% vs. platino-rodio 6%, Tipo B	+ 600 a + 1700 °C	1,5 °C ó 0,0025 (t)
Termocupla	Rango	Clase 3(2) . Desviación máxima (±) (1)
Cobre vs. Cobre-níquel, Tipo T	-200 a + 40 °C	1 °C ó 0,015 (t)
Hierro vs. cobre- níquel, Tipo J	-200 a + 40 °C	2,5 °C ó 0,015 (t)
Níquel-cromo vs. níquel, Tipo K	-200 a + 40 °C	2,5 °C ó 0,015 (t)
Platino-rodio 13% vs. platino, Tipo R	--	--
Platino-rodio 10% vs. platino, Tipo S	--	--
Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6%, Tipo B	+600 a + 1.700 °C	4 °C ó 0,005 (t)

Figura. 2.2 Tipos de termocuplas y sus características [10].

2.1.5.2. Válvula de expansión

Este dispositivo permite controlar el flujo de refrigerante y mantener una diferencia de presión entre el lado de alta y el de baja presión, para lograr que el refrigerante se evapore a la baja presión deseada y a la temperatura correspondiente. Existen varios tipos entre ellos están la válvula de expansión manual, la de expansión automática, la de expansión termostática y la válvula de expansión electrónica.

Válvula de expansión manual: Es una válvula que se ajusta manualmente para poder permitir el paso de más o menos refrigerante según sea necesario.

Válvula de expansión automática: Cuando la presión en el evaporador aumenta, esta vence al resorte y cierra la aguja. Al bajar la presión el resorte se expande lo cual hace que se abra la aguja, permitiendo así el paso del refrigerante al evaporador.

Válvula de expansión termostática: Es la de más amplio uso y su función es mantener un sobrecalentamiento constante en la salida del evaporador.

Válvula de expansión electrónica: Se utilizan en combinación con controles electrónicos. Permiten un buen funcionamiento del evaporador, manteniendo el mismo lleno de líquido y gas refrigerante. Esto hace posible que del evaporador salga gas sobrecalentado, para no dañar el compresor.

2.1.5.3. Resistencias calefactoras

Son resistencias diseñadas para transformar la energía eléctrica en calor. Esta manera de producir calor representa varias ventajas frente a otras formas de producirlo. Entre dichas ventajas se encuentran la ausencia de llama y gases de combustión, la limpieza y la facilidad para controlar y regular su funcionamiento.

2.1.5.4. Tipos de microcontroladores

Para poder realizar un adecuado sistema de control, se debe tener en cuenta las características que se requiere en uno de sus componentes más importantes, dicho componente es el controlador. En el presente diseño se contempla el uso de un microcontrolador como una parte importante del control de temperatura de la cámara adiabática del laboratorio de energía.

Los principales microcontroladores utilizados en la actualidad son los siguientes:

Microcontroladores de Intel: La MCS-51 es la familia básica de microcontroladores de 8 bits de Intel. Adecuada para aplicaciones de sencilla y mediana complejidad, que se ha convertido en uno de los principales estándares del mercado. Además otros fabricantes como Siemens Components, Atmel, Philips Semiconductors, etc., proporcionan versiones especializadas de esta familia [13].

Microcontroladores de Philips: Este fabricante cuenta con una gran variedad de microcontroladores de 8 bits basados en la arquitectura de la MCS-51. Posee microcontroladores con memoria EPROM, OTPROM o FLASH internas, versiones

que soportan el bus serie I²C, temporizador de watchdog, arreglo de contadores programable PCA, conversores A/D de 8 y 10 bits, funcionamiento en baja tensión, etc. [13].

Microcontroladores de Siemens: Compatibles tanto a nivel de hardware como software con la familia MCS-51. Pueden funcionar a altas temperaturas de reloj, pueden tener memoria ROM u OTPROM, puerto serie full dúplex, modos especiales de bajo consumo, varios registros de punteros de datos, etc. [13].

Microcontroladores PIC de Microchip: Estos microcontroladores poseen memoria de datos estructurada en palabras de de 8 bits y la de programa en palabras de 12, 14 o 16 bits. El número de instrucciones varía entre 33 y 77 dependiendo del modelo. Además poseen una memoria RAM de pequeña capacidad comprendida entre 25 y 3840 octetos, según el modelo, y direccionada por la memoria no volátil (EPROM, OTP, EEPROM o FLASH) que contiene el programa [13].

Microcontroladores de Atmel: Microcontroladores basados en la arquitectura de la familia MCS-51. Entre sus características principales tenemos que poseen memoria FLASH interna para los programas, memoria RAM interna, patillas bidireccionales de entrada / salida accesibles bit a bit, temporizadores / contadores de 16 bits, comunicación asíncrona full dúplex, múltiples fuentes de interrupción, interfaz ISP de bus serial y un temporizador de watchdog. Además algunos modelos poseen memoria EEPROM interna [13].

2.2. Tipos de cámaras para ensayos térmicos

El desarrollo de la presente tesis se basa en el diseño del control de temperatura de una cámara adiabática para ensayos de envejecimiento térmico. Dicho ensayo puede ser realizado tanto en hornos de mufla, en cámaras para ensayos térmicos o cámaras climáticas. La diferencia entre los equipos mencionados radica en que el horno trabaja con altas temperaturas, mientras que con los otros equipos las temperaturas no son tan elevadas e incluso estas pueden estar bajo cero. Además de la temperatura, las cámaras climáticas permiten controlar la humedad relativa dentro de la misma. Debido a que el rango de temperatura a controlar en esta tesis es de -20°C a 80°C, se ha considerado conveniente mostrar en las tablas 2.1 y 2.2 algunos de los modelos y características de las cámaras existentes en el mercado para el desarrollo de este tipo de ensayos.

Tabla N° 2.1 Características de la cámara FT210-40 de Desing Enviromental

Marca / Modelo	Desing Enviromental / FT210-40
Características	<ul style="list-style-type: none"> - Volumen de muestra : 200 Litros - Rango de temperaturas (°C): Max : +130 Min: - 40 - Dimensiones internas (mm): Ancho: 560 / Largo: 570 / Altura: 630 - Dimensiones externas (mm): Ancho: 850 / Largo: 1250 / Altura: 1640 - Tasa de enfriamiento con la cámara vacía en acorde con la norma IEC600068: 2.3 °C/min - Tasa de calentamiento con la cámara vacía en acorde con la norma IEC600068: 3.1 °C/min - Características Eléctricas: 220 V / 240 V monofásico, 50Hz, 7 A, 1.5 KW
Imagen	

Fuente [5]

Tabla N° 2.2 Características de la cámara SD-408 de AE Systems

Marca / Modelo	Associated Enviromental Systems / SD – 408
Características	<ul style="list-style-type: none"> - Volumen : 8 ft³ (aprox. 226.5 litros) - Rango de temperaturas (°C): Max : +200 Min: - 17 - Dimensiones internas (mm): Ancho: 24" / Largo: 24" / Altura: 24" - Dimensiones externas (mm): Ancho: 53" / Largo: 34" / Altura: 34" - Tiempo de subida a partir de la temperatura ambiente hasta el valor límite: Aproximadamente 30 minutos. - Tiempo de bajada a partir de la temperatura ambiente hasta el valor límite: Aproximadamente 25 minutos. - Características eléctricas: 220 V Monofásico, 60Hz.
Imagen	

Fuente [1]

2.3. Cámara adiabática del laboratorio de energía

El laboratorio de energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú cuenta con una cámara adiabática (ver figura 2.3), la cual está conectada a un módulo educativo de refrigeración por compresión de vapor, el cual permite bajar la temperatura de la cámara mediante la regulación manual de la válvula de expansión que se encuentra en el mencionado módulo educativo. Esta cámara fue construida utilizando acero galvanizado en las paredes internas y chasis de la cámara. Además de ello entre las paredes externas e internas la cámara cuenta con un relleno de poliestireno expandido para evitar la transferencia de calor desde y hacia fuera del ambiente.

Dimensiones internas:

Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
700	700	1210

Dimensiones externas

Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)
990	990	1530



Figura 2.3 Cámara adiabática. Imagen tomada del laboratorio de Energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

2.4. Equipo de refrigeración del laboratorio de energía

Como se ha mencionado anteriormente la cámara adiabática está interconectada a un sistema de refrigeración, el cual consiste en una planta de refrigeración de la marca J. & E. Hall Products, cargada con refrigerante R134a. Esta planta es utilizada en el laboratorio de energía con fines educativos y funciona de manera independiente a la cámara, pues la cámara funciona como un segundo evaporador en paralelo al evaporador que posee la propia planta. Así entonces cuando se quiere utilizar la cámara se habilita la línea que pasa por ella y se deshabilita la línea del evaporador de la propia planta, quedando el sistema como se muestra en la figura 2.4:

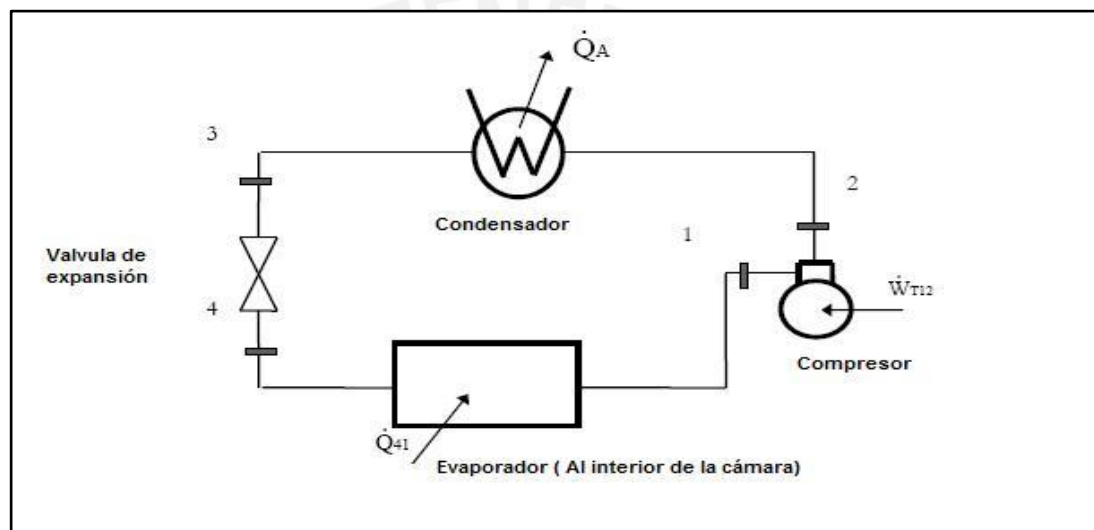


Figura. 2.4 Diagrama del sistema de refrigeración por compresión de vapor [18].

En la figura 2.4 se muestran los elementos principales con los que cuenta el sistema de refrigeración por compresión de vapor, el cual cuenta con el compresor que aspira y comprime el vapor saturado que sale del evaporador, además de ello el compresor eleva la presión y la temperatura de dicho vapor. El sistema también cuenta con el condensador que se encarga de enfriar y condensar el vapor proveniente del compresor liberando calor al espacio circundante que puede ser aire o agua. Una vez condensado, el refrigerante pasa por la válvula de expansión que genera una caída de presión en el refrigerante lo que genera una pequeña mezcla de líquido y vapor a una presión adecuada de tal modo que la vaporización del líquido en el evaporador se efectúe a la temperatura deseada, consiguiendo extraer el calor del medio a refrigerar para poder evaporizar el refrigerante, con lo cual se cierra el ciclo.



CAPÍTULO 3

DISEÑO ELECTRÓNICO DEL CONTROL DE TEMPERATURA DE LA CÁMARA ADIABÁTICA

3.1. Objetivos

3.1.1. Objetivo general

El desarrollo del presente tema de tesis tiene como objetivo general realizar un correcto diseño del control de la temperatura de una cámara adiabática, el cual pueda ser posteriormente implementado en la cámara adiabática que posee el Laboratorio de Energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

3.1.2. Objetivos específicos

- El diseño permitirá reducir el error debido al sensor de temperatura mediante el uso de una etapa de acondicionamiento de la señal proveniente del sensor.

- El diseño presentado permitirá controlar la temperatura dentro de la cámara en el rango de -20°C y 80°C , mediante el control de las resistencias calefactoras y del control de la válvula de expansión.
- Se mostrará la temperatura con una resolución de 0.1°C mediante el uso de una pantalla LCD y también se podrá ingresar parámetros deseados con el uso del teclado matricial.

3.2. Diagrama de bloques

El diseño del presente sistema de control consta de dos partes importantes que conjuntamente ayudan a lograr el objetivo de control, una de ella es el hardware y la otra es el software. En la figura 3.1 se presenta el diagrama de bloques que permitirá entender mejor el diseño a ser desarrollado en la presente tesis:

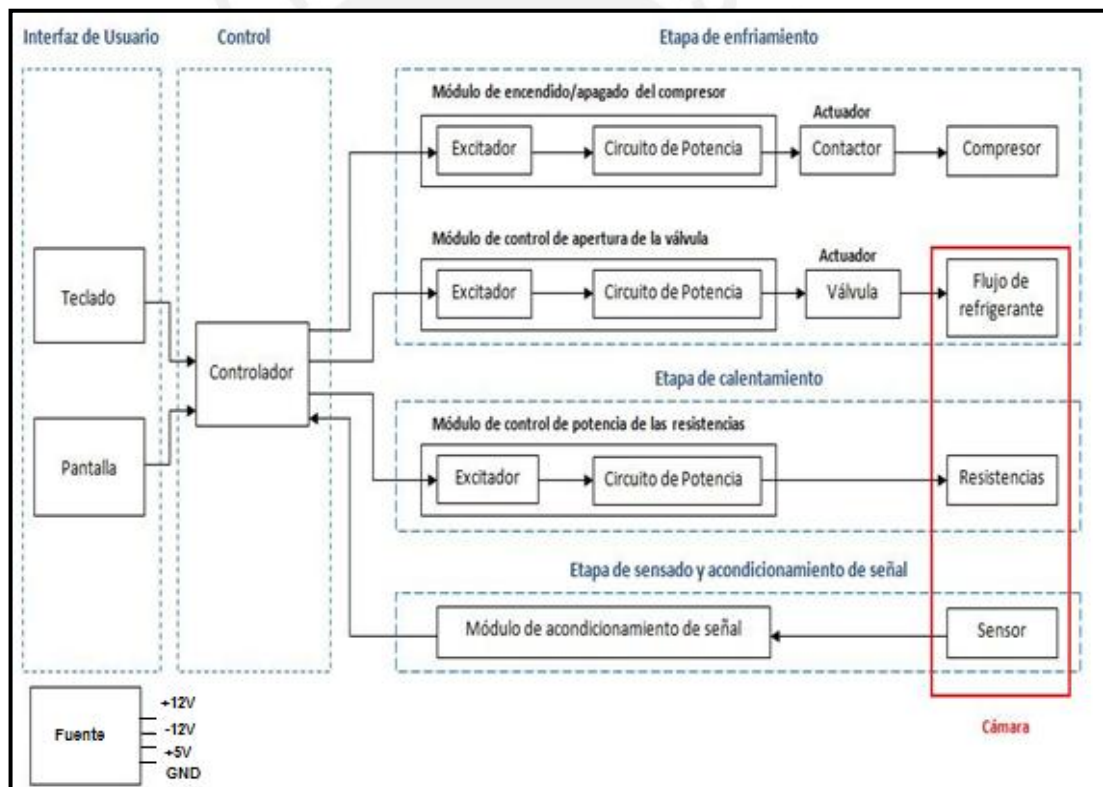


Figura. 3.1 Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura de la cámara adiabática.

El sistema cuenta con una interfaz de usuario que le permitirá, mediante el uso de un teclado matricial, ingresar valores de temperaturas deseados que se encuentren dentro del rango de funcionamiento del equipo. Además con el uso de una pantalla LCD se mostrará la temperatura dentro de la cámara.

Cuando se desee elevar la temperatura de la cámara se hará uso de las resistencias calefactoras que se encuentran en el interior de la misma, mediante el uso de una tarjeta electrónica que controle el voltaje a la cual se alimentan las resistencias. Al aumentar el valor eficaz del voltaje con el cual son alimentadas dichas resistencias, aumenta la potencia de las mismas, logrando así elevar la temperatura de manera más rápida. Cabe mencionar que desde que el equipo es puesto en funcionamiento se enciende un ventilador dentro de la cámara con el propósito de mantener una temperatura homogénea dentro de la misma.

En el caso que se desee disminuir los valores de temperatura dentro de la cámara se deberá controlar el encendido del compresor y la apertura de la válvula de expansión electrónica. Esto se realiza mediante el uso de una tarjeta electrónica que sirve de interfaz entre el controlador, la válvula de expansión y los contactores que encienden el compresor. Esta tarjeta permite controlar la válvula de expansión electrónica enviándole señales de control con determinado ancho de pulso, esto permitirá controlar la cantidad de flujo del refrigerante que pase por la válvula de expansión electrónica y con ello lograr una disminución en la temperatura de la cámara adiabática.

3.3 Requerimientos generales del sistema

La presente tesis busca elaborar el diseño de un control de temperatura para una cámara adiabática, específicamente para la cámara que posee el laboratorio de energía de la PUCP, en la cual se piensa realizar la posterior implementación del diseño propuesto. Por este motivo es importante mencionar los requerimientos solicitados para este sistema por parte de los encargados de dicho laboratorio. Estos requerimientos son los siguientes:

- El diseño debe permitir que la temperatura dentro de la cámara llegue a ser la establecida por el usuario, dentro del rango de -20°C a 80°C .
- El diseño debe permitir visualizar la temperatura dentro de la cámara con una resolución de 0.1°C .
- El grado de error no debe exceder los 2°C .
- El diseño debe permitir que la temperatura se mantenga dentro del nivel deseado por un tiempo de hasta 10 días.
- Se debe en lo posible utilizar los elementos que dispone el laboratorio.

3.4. Diseño del Hardware del sistema

En esta parte se explica el diseño de los circuitos que conforman parte de los distintos módulos planteados, para lo cual se tiene que analizar los requerimientos que debe cumplir cada circuito, las características de los componentes que lo conforman, las alternativas con las que se cuente y finalmente seleccionar en base a criterios.

3.4.1. Diseño de la tarjeta de control principal

El componente principal de esta tarjeta es el microcontrolador, que será el encargado de recibir la señal proveniente de la etapa de sensado y acondicionamiento de señal y en base a ello enviará las señales de control correspondiente a los otros módulos. Por ello es importante en primer lugar la definición de los requerimientos que debe cumplir dicho microcontrolador para asegurarnos que obtendremos una respuesta deseada.

Requerimientos:

El microcontrolador seleccionado debe tener la cantidad de puertos de entrada / salida necesarios para poder trabajar con el teclado matricial, la pantalla LCD y los módulos que forman parte del sistema de control. El número exacto de pines que se necesita para ello es de 20, de los cuales 6 son entradas (PB5:PB2 para las filas F3:F0 del teclado, PC1 para recibir la señal del circuito de acondicionamiento y PD3 para el detector de cruce por cero) y 14 son salidas (PB1, PB0 para el control de la válvula y el compresor respectivamente, PC0 para el control de potencia de las resistencias, PC5:PC2 para las columnas del teclado, PD7:PD4 para los datos del LCD y PD0, PD1, PD2 para las señales de control del LCD ,E, R/W, RS). Además de ello el microcontrolador debe contar con un número mínimo de temporizadores y de rutinas de interrupción específicas (interrupción externa, por comparación exitosa del temporizador), con el objetivo de poder realizar un control eficiente y rápido.

Para un correcto funcionamiento del sistema de control de temperatura a diseñar, se requiere procesar de manera rápida la señal adquirida en la etapa de acondicionamiento, esto permite que la señal de control sea la adecuada y también ayuda a que la temperatura visualizada sea la correcta. Se debe considerar que la temperatura en la cámara varía con una velocidad máxima de aproximadamente 5°C/s.

Alternativas:

Existe una gran diversidad de microcontroladores que podrían cubrir ampliamente los requerimientos anteriormente mencionados, pero lo que se busca es encontrar un microcontrolador que se ajuste a nuestra necesidad y en tal sentido se ha encontrado que los siguientes microcontroladores cumplen con tal premisa, lo cual se muestra en la tabla 3.1:

Tabla Nº 3.1 Características principales de los uC Atmega8 y PIC 16F1516

Características	Atmega8	PIC16F1516
Número de instrucciones	130	49
Memoria de programa (Flash)	8 KB	14 KB
Memoria SRAM	1 KB	512 Bytes
Número de entradas/salidas	23	25
Temporizadores	2 (8bits) / 1 (16 bits)	2 (8bits) / 1 (16 bits)
ADC	6 canales de 10 bits	17 canales de 10 bits
Interrupciones externas	2	8
Voltaje de operación	2.7V – 5.5V	2.3V – 5.5V

Fuentes: [2] y [15].

Los valores presentados en el cuadro fueron tomados de las respectivas hojas de datos de cada microcontrolador.

Criterio de selección:

Las características presentadas en el cuadro anterior son muy similares y ambas cumplen con los requerimientos mencionados, pero se optó por seleccionar el microcontrolador Atmega 8 debido a que cuenta con un mayor número de instrucciones, lo cual facilita la tarea de programación. Además que la formación universitaria recibida y el desarrollo de otros proyectos ha permitido que el programador se encuentre más familiarizado con el uso de este microcontrolador.

Diseño del circuito de control principal:

En el diseño del circuito de control principal se ha incluido el circuito de detector de cruce por cero que permitirá que el microcontrolador envíe una señal de control al módulo de control de potencia de las resistencias. En la figura 3.2 se muestra el circuito diseñado:

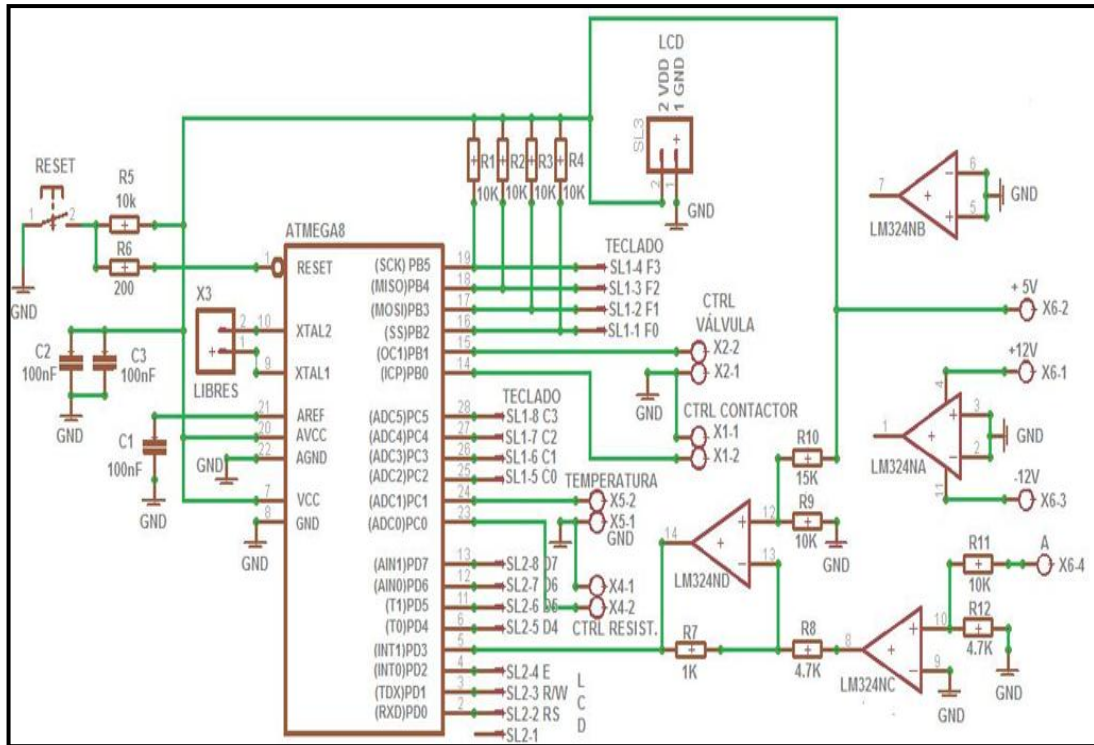


Figura 3.2 Diagrama esquemático del circuito de control principal

El circuito de detector de cruce por cero está conformado por el integrado LM324, el cual contiene 4 amplificadores operacionales. Para detectar si la señal proveniente de una de las líneas extremas del transformador de 15-0-15 V cruzó por 0 V, se utilizan dos de los opamps del integrado. En el opamp se compara el voltaje de la entrada positiva con cero colocando a tierra el pin Vi (-), las resistencias R11 y R12 sirven para limitar el voltaje de entrada Vi (+) y que no exceda los valores de alimentación +/- 12 V, así entonces, cuando el voltaje proveniente del transformador es +/- 21.21 V, el valor de la entrada será +/- 6.78V debido al divisor resistivo formado por dichas resistencias. Luego de esta etapa se utiliza el siguiente opamp como un restador para limitar el voltaje que llegará al pin PD3 del Atmega8. Las resistencias R9 y R10 forman un divisor de voltaje mediante el cual se obtiene un valor de 2 V en la entrada Vi (+) del opamp, mientras que las resistencias R7 y R8 se utilizan para completar el circuito de resta. La salida de este segundo opamp toma los valores de 0.2 V y 4.97 V cuando las salidas del primer opamp son 10.3 V y -11.8 V respectivamente. Estos valores son obtenidos mediante el siguiente cálculo:

$$\text{Si:} \quad V_i (+) = 2V \rightarrow V_i (-) = 2V$$

$$\text{Entonces:} \quad \frac{V_{out1} - 2}{4.7K} = \frac{2 - V_{out2}}{1K}$$

De donde se obtiene que: $V_{out2} = \frac{11.4 - V_{out1}}{4.7}$

Vout1: Salida del primer opamp.

Vout2: Salida del segundo opamp.

Este circuito de control principal tiene las salidas y entradas necesarias para que pueda interactuar con los demás circuitos y poder así realizar el control de los demás módulos. A continuación se detallan cuales son estas entradas y salidas:

Para el teclado se cuenta con 4 entradas (Fila3:0) y 4 salidas (Columna3:0) que están conectadas a los pines PB5:2 y PC5:2 del microcontrolador respectivamente. Además para la pantalla LCD esta tarjeta cuenta con 7 salidas para poder enviar datos y comandos a la pantalla, estas son (D7:4) y Enable, R/W y R/S que están conectadas a los pines PD7:4 y PD2:0 del Atmega8 respectivamente. Para el control de la válvula y del compresor se cuentan con dos salidas que están conectadas a PB0 y PB1 respectivamente, mediante las cuales se envía señales de activación a los módulos correspondientes. El circuito también cuenta con una entrada que proviene de la etapa de acondicionamiento de señal y que se conecta con el pin PC1 del Atmega8 y permite hacer uso del ADC 1 del microcontrolador. Se tiene también la salida proveniente del pin PC0, por la cual se enviará la señal que irá al módulo de control de potencia de las resistencias.

Para finalizar esta tarjeta cuenta con borneras para conectar los voltajes de alimentación (+12V, -12V, +5V, A y Gnd), para energizar tanto el microcontrolador como los circuitos integrados y componentes que forman parte de esta tarjeta.

3.4.2. Diseño del módulo de sensado y acondicionamiento de señal

En esta etapa se obtiene el valor de la temperatura dentro de la cámara por medio de un sensor de temperatura que entrega una señal que será acondicionada para que así sea pueda trabajar adecuadamente con el conversor A/D del Atmega8.

Requerimientos:

El rango de temperaturas que se quiere controlar dentro de la cámara adiabática está entre -20°C y 80°C así que el sensor y el acondicionamiento de la señal del mismo deben ser los adecuados para trabajar dentro de ese rango. Debe también permitir un fácil montaje en el sistema.

Alternativas:

Una de las opciones para el sensado de la temperatura dentro de la cámara es el uso de termocuplas pues trabajan en un amplio rango de temperaturas y se pueden introducir y acoplar fácilmente dentro de la cámara. La otra opción es utilizar el LM35 que es un integrado que sensa la temperatura y da un valor a la salida de 10mV/°C. Además trabaja dentro del rango de -55°C hasta 150°C.

Criterio de selección:

Si bien ambas opciones trabajan dentro del rango deseado se opta por usar una termocupla, debido a que su montaje es más fácil al no tener que adecuarle nada físicamente y no se corre el riesgo de cortocircuito como en el caso del LM35 cuyos terminales de alimentación se encontrarían dentro de la cámara. La disponibilidad es otro factor que influye, pues el laboratorio de energía cuenta con termocuplas tipo k.

Diseño del circuito de acondicionamiento de señal:

Las señales que brindan las termocuplas en general son el orden de los microvoltios, por lo cual necesitan ser amplificadas. El AD595 es un CI diseñado para realizar la amplificación de las señales de las termocuplas tipo k, motivo por el cual se utilizará en el presente diseño. Este integrado entrega 10mV/°C y además posee compensación por junta fría que permite eliminar el efecto de la temperatura ambiente sobre la medición. En la figura 3.3 se presenta el diagrama esquemático del circuito:

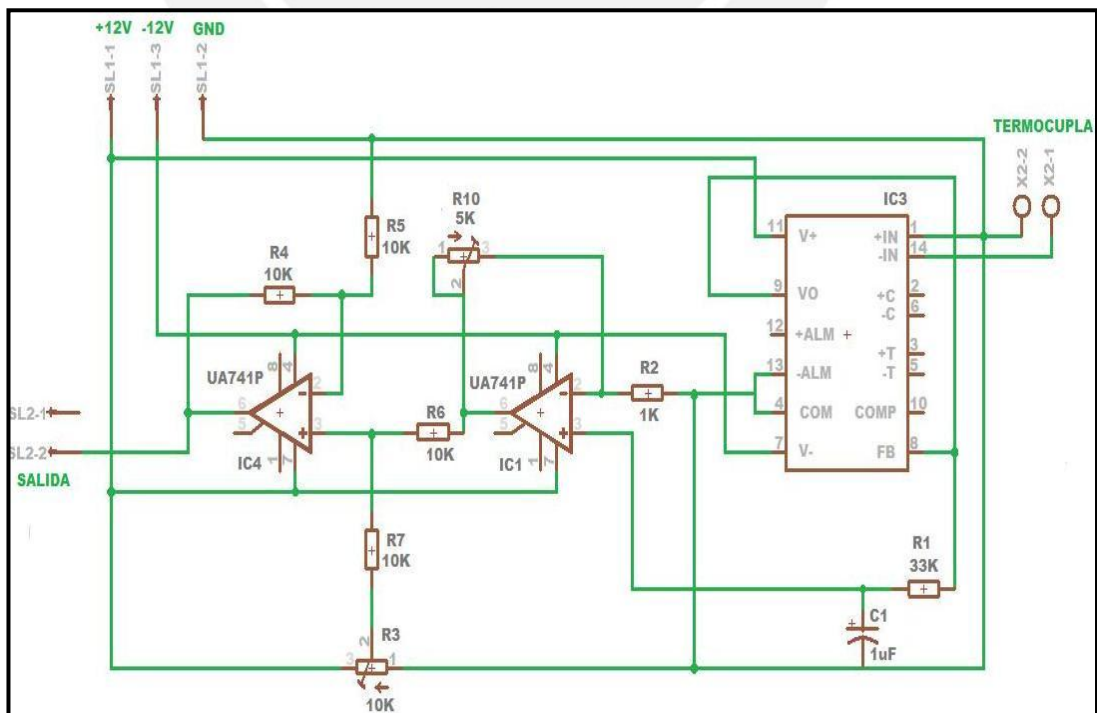


Figura 3.3 Diagrama esquemático del circuito de acondicionamiento de señal

El presente circuito cuenta con dos entradas para los contactos de la termocupla, las cuales están conectadas a los pines 1 y 14 del CI AD595, este integrado entregará en su pin de salida (pin 9) el valor correspondiente a la temperatura medida con un factor de conversión de 10mV/°C. Dicha salida está conectada a un filtro pasa bajo formado por R1 y C1 con frecuencia de corte de 4.8Hz para evitar el ruido de línea. Una vez que pasa por el filtro, la señal obtenida entra a una etapa de amplificación mediante el uso del amplificador operacional UA741. En dicha etapa la ganancia está dada por:

$$G = 1 + \frac{R10}{R2}$$

Donde R10 es un potenciómetro de precisión de 5KΩ, lo que nos permite regular la ganancia de este amplificador no inversor.

Debido a que se trabajará en el rango de -20 °C a 80 °C, los voltajes que se pueden obtener a la salida del AD595 estarán entre los - 200mV y 800mV. Para poder aprovechar mejor la capacidad del ADC del Atmega8, es necesario ajustar los valores que entrega el AD595, por ello se utilizó una etapa de amplificación y otra de desplazamiento. Estas etapas sirven para que la señal proveniente del AD595 se ajuste a la curva $y = 5X+1$, es decir con una amplificación de 5 y un offset de 1, con lo cual dicha señal queda comprendida ahora en el rango de 0 a 5 V. Este circuito cuenta además para la alimentación de los integrados, se consideran entradas para los voltajes de +12V, -12V y GND.

3.4.3. Diseño del módulo de control de potencia de las resistencias

Este módulo permite controlar la potencia de las resistencias calefactoras y a la vez proteger al microcontrolador pues permite separar la etapa de potencia de la de control.

Requerimientos:

Los componentes elegidos para esta tarjeta deben permitirnos trabajar con los voltajes de salida del Atmega8 para variar la potencia de las resistencias calefactoras sin que exista conexión directa entre el microcontrolador y la parte de potencia del circuito. Además se debe tener en cuenta que las resistencias calefactoras tienen como valor nominal una alimentación de 220Vac y que por cada una circula una corriente de aproximadamente 4 Amperios.

Alternativas:

Para poder controlar la potencia de las resistencias calefactoras, una forma práctica y difundida es usando un Triac.

Criterio de selección:

En el presente diseño se optó por el uso de un triac debido a su fácil implementación y a que su control es sencillo. Por ello se utilizará el Triac BTA41 600B que soporta hasta 600 V entre sus terminales y un paso de corriente de hasta 40A, lo cual cumple con los requerimientos dados para el control de las resistencias calefactoras. Además para poder aislar la parte de potencia de la de control se utilizará el MOC 3021 que es un optoacoplador y permitirá que el Atmega8 active de manera indirecta el triac cada vez que envíe un pulso de corta duración y amplitud de 5 V.

Diseño del circuito de control de potencia de las resistencias calefactoras:

Como ya se mencionó los componentes fundamentales de este circuito son el optoacoplador y el triac. En la figura 3.4 se muestra el diseño realizado:

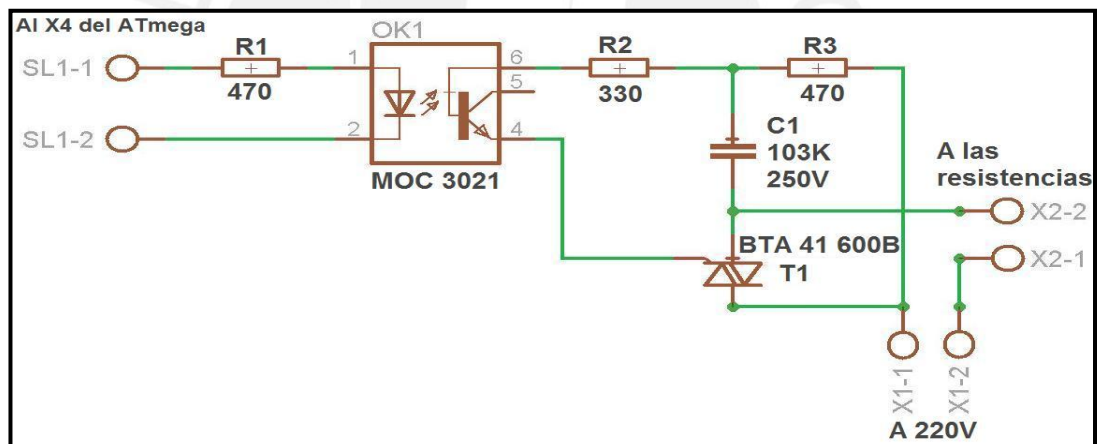


Figura 3.4 Diagrama esquemático del control de potencia de las resistencias.

Este circuito contiene entradas para las señales de control enviadas por el microcontrolador, las cuales activan a su vez el triac que viene dentro del MOC3021. La resistencia R1 limita a 8mA la corriente que activa al emisor del optoacoplador, lo cual es suficiente según la hoja de datos del optoacoplador. Las resistencias R2, R3 y el capacitor C1 son colocados para proteger el acoplador de variaciones bruscas de tensión y sus valores son dados según la hoja de datos del MOC3021. Esta tarjeta además posee las borneras para conectar la alimentación de 220 Vac y las resistencias calefactoras.

3.4.4. Diseño del módulo de control de apertura de la válvula

Para controlar el flujo de refrigerante hacia la cámara y con ello disminuir la temperatura de la misma, se va a utilizar la válvula de expansión electrónica AKV10-1 marca Danfoss que cuenta con una bobina de 220V AC a 60Hz. Cuando llega un pulso positivo, la válvula se abre y cuando llega uno negativo, esta se cierra. El flujo de refrigerante que pasa por la válvula, es el promedio del que pasa durante un período. Éste período debe ser de 6 segundos por recomendación del fabricante.

Requerimientos:

Como ya se mencionó la bobina de la válvula debe ser activada con 220Vac y para poder controlar la válvula la tarjeta debe permitir el paso de la señal alterna durante el tiempo dado por una onda PWM de periodo igual a 6 segundos.

Alternativas y criterio de selección:

Debido a que los requerimientos son muy similares al del control de potencia de las resistencias calefactoras, se consideran las mismas alternativas mencionadas para ese ítem y los criterios de selección de componentes es el mismo.

Diseño de la tarjeta de control de apertura de la válvula:

Si bien es cierto que al igual que en el caso del control de potencia de las resistencias eléctricas, se escogió un triac; el modelo escogido es otro (BTA 136) pues aquí no es necesario que el triac maneje una corriente de 12 A sino una corriente menor a 1A pues la bobina se alimenta a 220Vac y es de 10W.

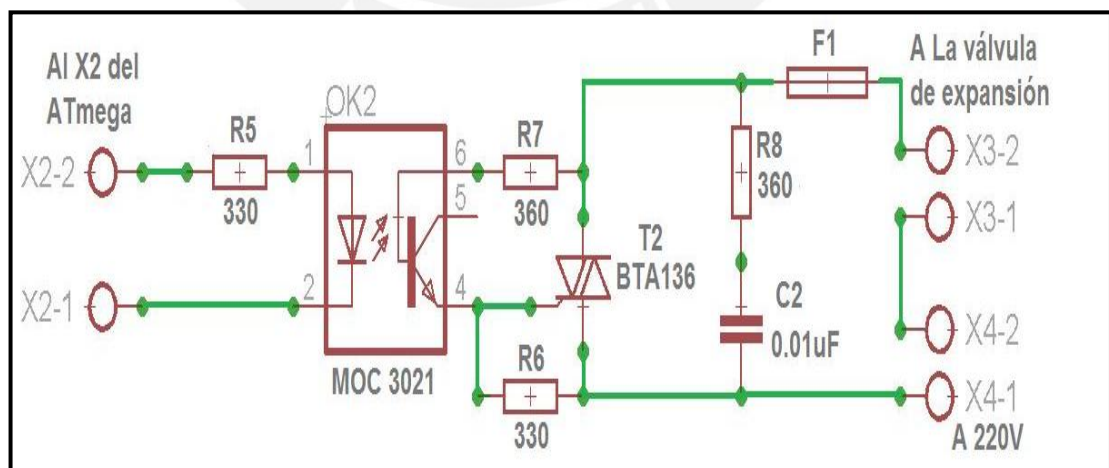


Figura. 3.5 Diagrama esquemático del control de apertura de la válvula.

El circuito mostrado en la figura 3.5 recibe las señales PWM enviadas por el microcontrolador, las cuales tienen un voltaje máximo de 5V, al igual que en el

circuito anterior la resistencia que va a la entrada del MOC3021 tiene la función de regular la corriente que pasa por el emisor. El circuito incluye un fusible de 1 A para protección frente a cortocircuitos.

3.4.5. Diseño del módulo de encendido y apagado del compresor

Para poder poner en funcionamiento la etapa de refrigeración es necesario encender el compresor o apagarlo en el caso de que no sea necesario enfriar. La tarjeta a diseñar aquí permite cumplir con aquella tarea.

Requerimientos:

Este circuito debe permitir alimentar un Contactor de 220Vac y manejar una corriente de control menor a 1 A, lo cual permitirá encender el compresor.

Alternativas y criterio de selección:

Se mantienen las alternativas y el criterio de selección del módulo de control de apertura de la válvula, debido a la similitud de los requerimientos.

Diseño del circuito de encendido-apagado del compresor:

Este circuito es idéntico a la diseñada para el control de apertura de la válvula de expansión electrónica, con la diferencia que aquí se utilizará para energizar o no al contactor que encenderá el compresor cuando se requiera bajar la temperatura dentro de la cámara adiabática. La figura 3.6 muestra el circuito diseñado:

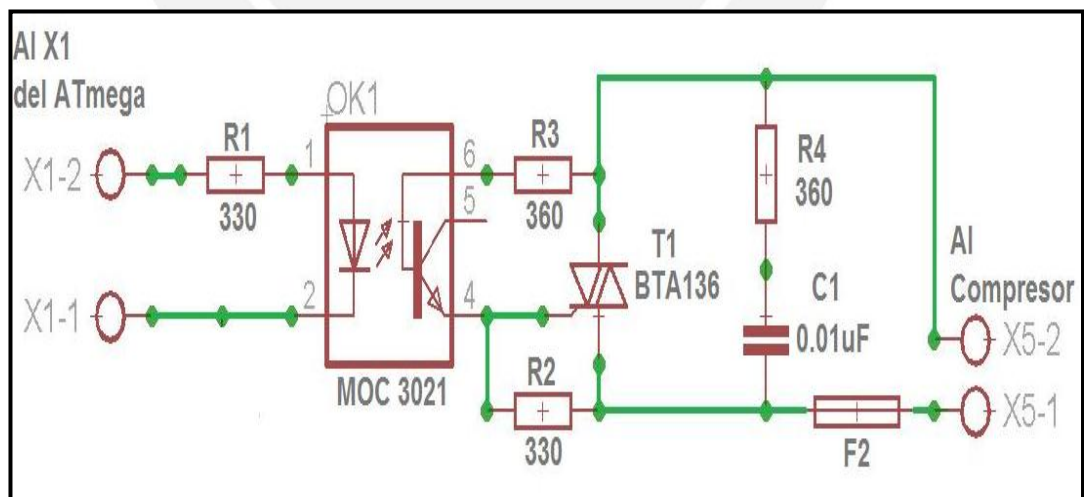


Figura 3.6 Diagrama esquemático del circuito de encendido-apagado del compresor

3.4.6. Diseño del circuito de alimentación

Una parte esencial para el funcionamiento de los circuitos diseñados es que estos cuenten con una fuente de alimentación, el diseño de este circuito se realiza luego de tener definidas las cargas que alimentará.

Requerimientos:

Este circuito debe ser capaz de entregar los voltajes de +12V, -12V y 5 V. Además debido a que los principales componentes a alimentar son el microcontrolador Atmega8, los CI's LM324, UA741 y AD595, es necesario tener en cuenta la corriente que consumen como máximo dichos componentes a fin de dimensionar el transformador que utilizará dicha fuente, estos valores de voltaje y corriente son mostrados en la tabla 3.2.

Tabla N° 3.2 Valores de voltajes y corrientes de los circuitos integrados del sistema

Componente	Voltaje de alimentación (Vdc)	Corriente que consume (mA) Max
Atmega8	+ 5	400
Lm324	+/- 12	70
AD595	+/- 12	50
UA741	+/-12	3.3

Fuente: Hojas de datos (Ver Anexos)

Alternativas:

Una opción para alimentar los circuitos diseñados es comprar y utilizar una fuente ya fabricada, que posea dentro de sus valores de salida, los voltajes y corriente deseados. La otra opción es realizar el diseño de la fuente.

Criterio de selección:

Se optó por diseñar la fuente porque así se obtiene solamente las salidas necesarias sin tener salidas sin utilizar y además de que al diseñarla se puede adecuar el tamaño de la tarjeta (en el caso de su implementación), lo cual permite que pueda ser acoplada sin dificultad con las demás tarjetas al momento de integrarlas todas en un solo módulo.

Diseño del circuito de alimentación:

Aquí se explica el circuito de alimentación diseñado, el cual se muestra en la figura 3.7:

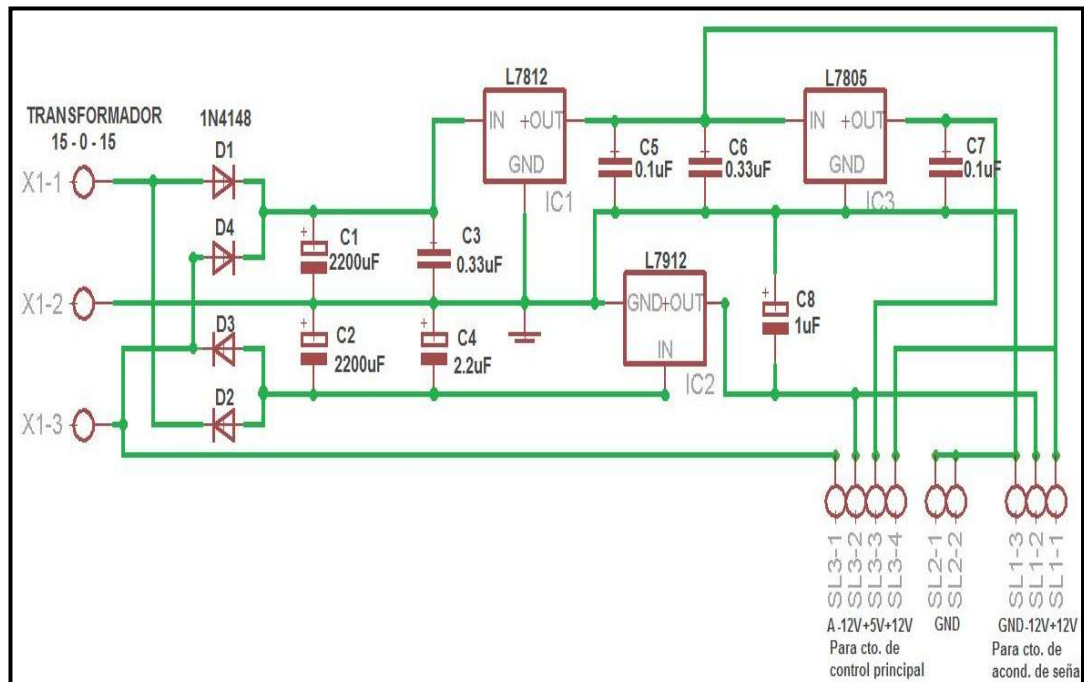


Figura. 3.7 Diagrama esquemático de la fuente de alimentación

En este circuito las entradas provenientes del transformador 15-0-15 con toma central pasan por una etapa de rectificado y filtrado conformada por los diodos D1, D2, D3, D4 y por los capacitores electrolíticos de 2200uF, luego la salida del filtro se distribuye hacia las entradas de los integrados L7812, L7912 y L7805, los cuales sirven para regular el voltaje de entrada proveniente del filtro y entregar a su salida +12V, -12V y +5V respectivamente. Estos integrados soportan una corriente de hasta 1A, lo que es suficiente para alimentar a los demás integrados, pues según hoja de datos el Atmega8 no consume más de 400 mA entre todos sus puertos, el LM 324, AD595 y el UA741 no en conjunto no exceden los 400 mA tampoco, motivo por el cual se puede trabajar con los reguladores de voltaje mencionados.

3.5. Diagrama de conexiones

La figura 3.8 presenta como será diagrama de conexiones de los circuitos diseñados:

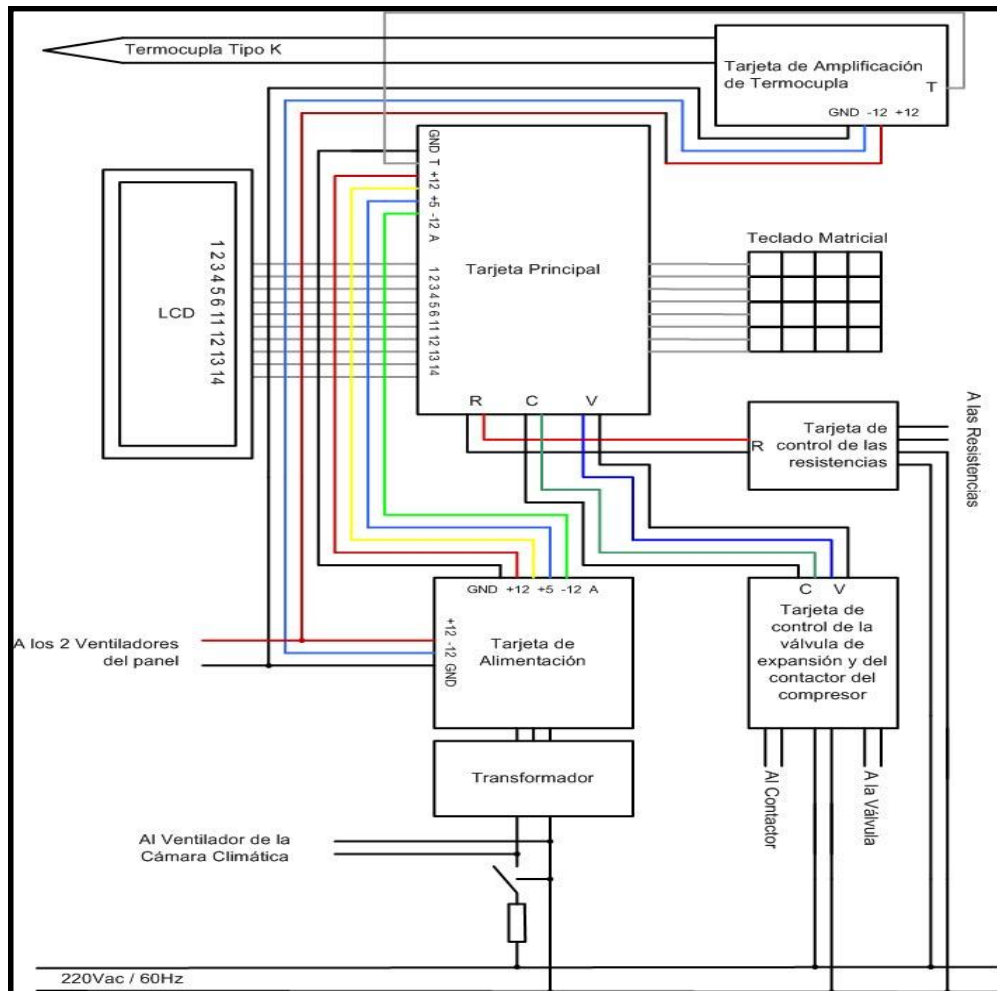


Figura. 3.8 Diagrama de conexiones del sistema.

3.6. Diseño del software del sistema

El hardware diseñado no logrará el control de temperatura de la cámara adiabática por sí solo, sino que requiere de un software que lo complemente además de que permita integrar y controlar todos los módulos del sistema. En esta parte se muestran las partes más resaltantes que presenta el software elaborado.

3.6.1. Diseño del programa principal

El programa principal ha sido diseñado para que tenga una funcionalidad particular e integre todos los bloques antes mostrados. Permite el ingreso de datos, en este caso en particular, permitirá el ingreso de los valores de temperatura a los cuales el control tenderá a llegar siempre que estén dentro del rango de funcionamiento (-20°C y 80°C). También permite el ingreso del tiempo durante el cual se desee que permanezca la temperatura ingresada anteriormente. El programa inicia salvando el valor del puntero de pila, luego de lo cual procede a realizar las configuraciones generales que incluyen la configuración de puertos, interrupciones, temporizadores,

manejo del lcd, etc. Una vez realizadas las configuraciones el programa solicita la temperatura deseada y luego de una posterior validación solicita el tiempo durante el cual se desea realizar el ensayo. Para finalizar espera que se presiones el botón de “enter” para dar inicio al control. Entre cada ingreso de valores existe una validación para asegurarse que se trabajará con valores dentro del rango de -20°C a 80°C.

La figura 3.9 muestra el diagrama de flujo del programa principal:

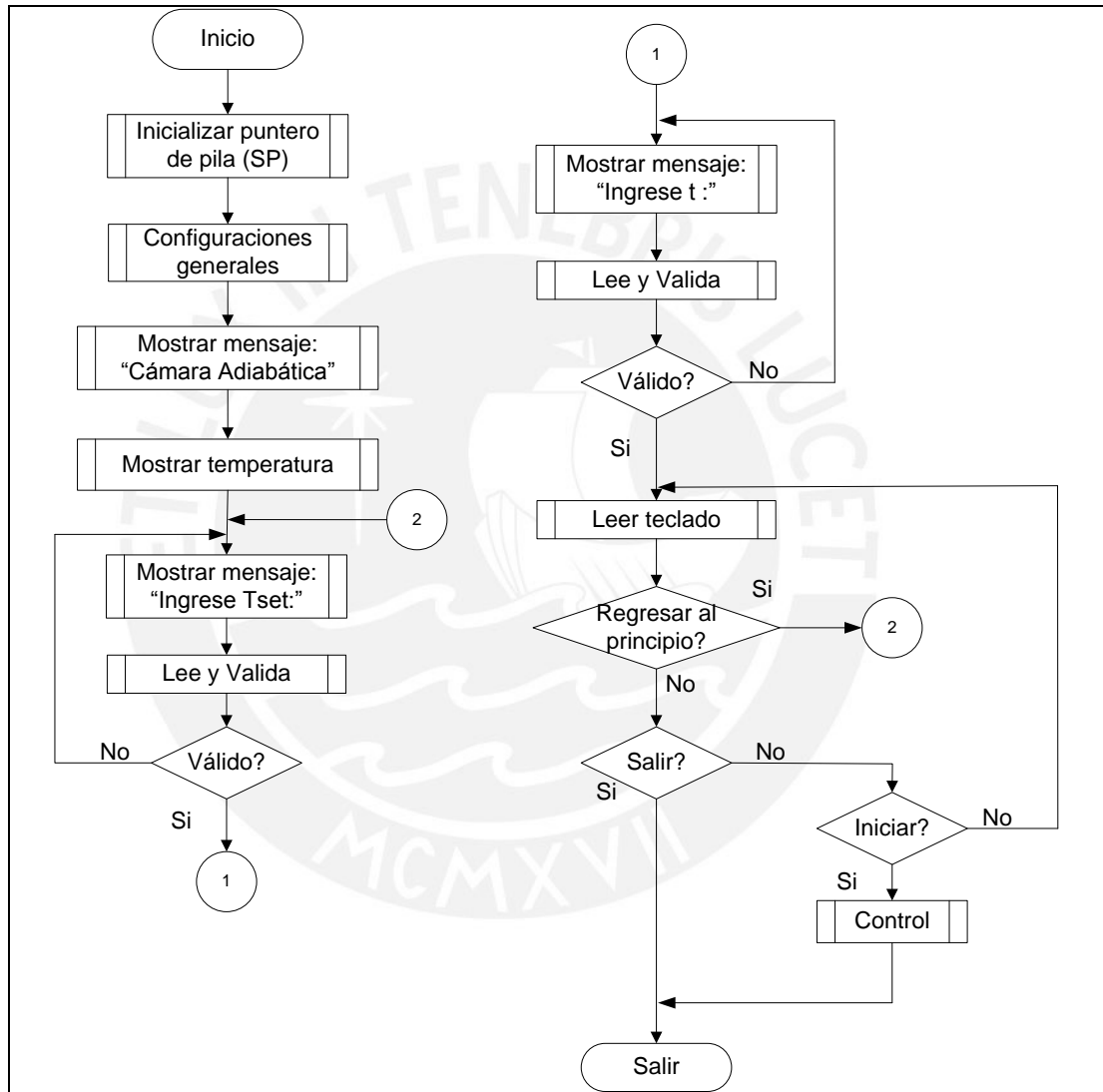


Figura 3.9: Diagrama de flujo del programa principal

3.5.2. Diseño de subrutinas

Para un mayor orden el programa cuenta con subrutinas que facilitan la labor del programador. Así entonces el programa cuenta con subrutinas para la configuración de puertos, de la pantalla LCD, del ADC del Atmega8, interrupciones a utilizar, subrutinas para la lectura del teclado matricial, para mostrar datos en la pantalla

LCD, etc. A continuación se muestran algunas de las subrutinas que utiliza el programa principal:

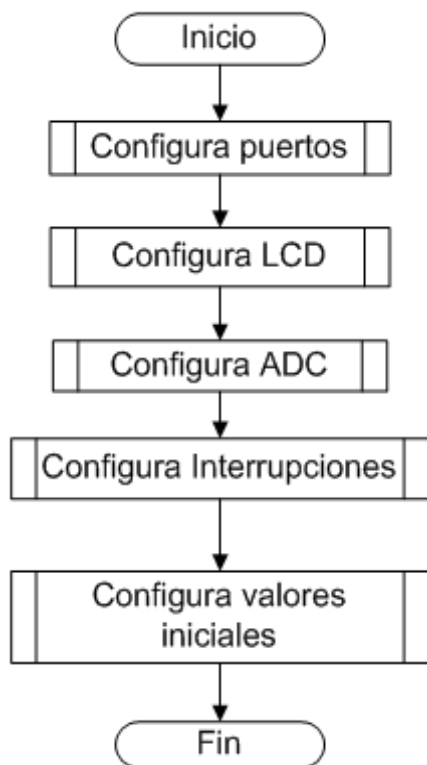


Fig. 3.10 a Rutina de configuración general

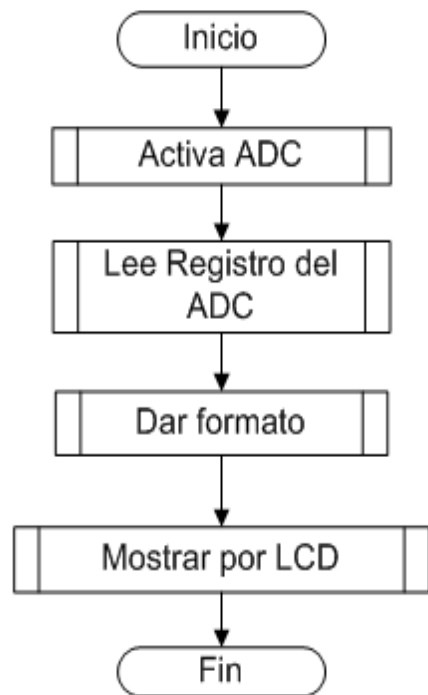


Fig. 3.10 b Rutina para el ADC



Fig. 3.10 c Rutina para explorar el teclado

La subrutina de configuración general (Figura 3.10 a) contiene las configuraciones principales para poder definir los pines del microcontrolador como entradas o salidas, para poder configurar el LCD utilizando solo 4 bits para el envío de datos, configurar el ADC01 del Atmega8 con un voltaje de referencia de 5 V y en modo de conversión única. Además permite configurar las interrupciones a utilizar

(interrupción externa para el detector de cruce por cero, por comparación exitosa del temporizador 1 para variar el ángulo de disparo del Triac y por final de cuenta en el temporizador 0 para poder incrementar la cuenta del reloj). Para poder visualizar la temperatura dentro de la cámara, el programa cuenta con una subrutina que utiliza el resultado de la conversión realizada por el ADC, para mostrar la temperatura por la pantalla LCD (Figura 3.10 b). Otra de las subrutinas que presenta el programa es la que permite leer el teclado para determinar que tecla se presionó y con ello permitir el ingreso de datos (Figura 3.10 c).

3.5.3. Diseño de interrupciones

El programa también cuenta con el uso de subrutinas de servicio de interrupción para hacerlo más eficiente. En las figuras 3.11 a y b se muestran los diagramas de flujo de la RSI debido a una interrupción externa y la RSI por comparación exitosa en el temporizador 2 respectivamente.

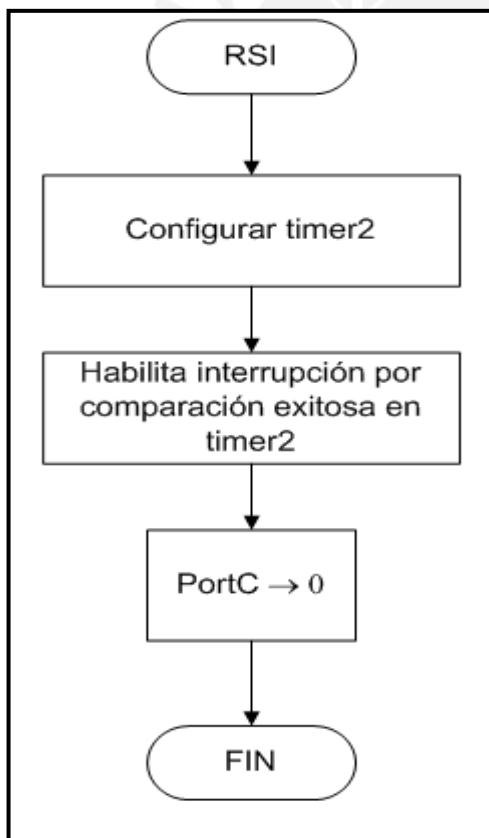


Figura 3.11 (a) RSI por interrupción externa (INT1)

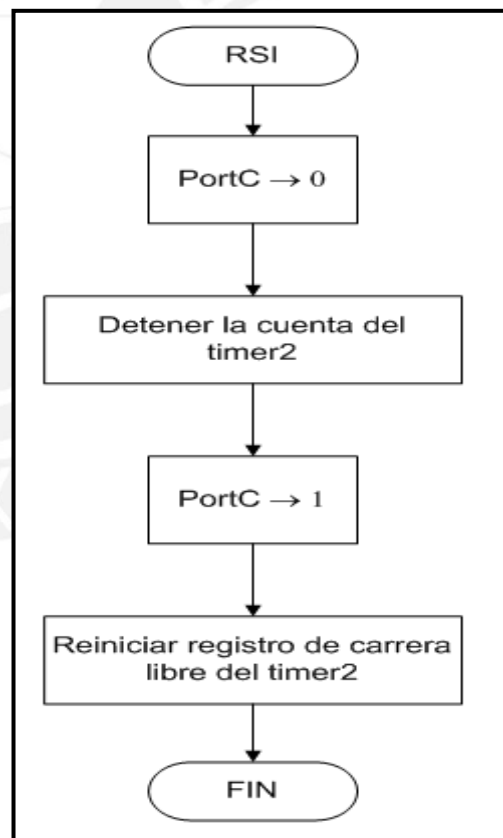
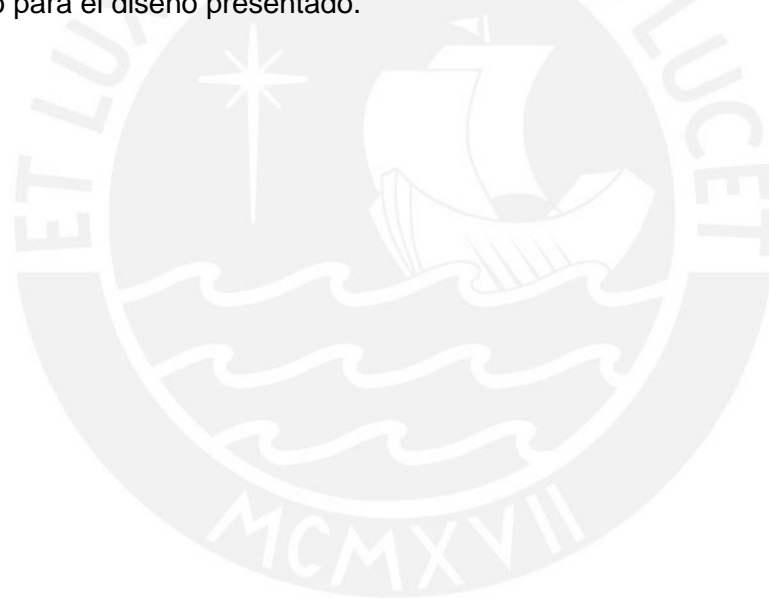


Figura 3.11 b RSI por comparación exitosa del temporizador 2

3.7 Error del sistema

El uso del circuito integrado AD595C para amplificar la señal proveniente de la termocupla tipo K, nos permite tener un mínimo error en la adquisición de dicha señal. Este error es como máximo de $\pm 0.75\%$ del valor de temperatura medido según hoja de datos (ver anexos), por lo que para nuestro valor máximo de temperatura, que es de 80°C , se obtendrá en el peor de los casos un error de $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$. Otro factor de error a considerar es el introducido por la propia termocupla, la cual puede presentar como máximo un error de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, este error es lineal dentro del rango de temperatura en el cual se quiere trabajar. Por lo tanto el uso del offset dentro de la etapa de acondicionamiento y sensado nos ayuda a reducir dicho error y nos permite calibrar la etapa de sensado. En el siguiente capítulo se muestran los resultados de la etapa de sensado y acondicionamiento de señal (ver tablas 4.1 y 4.2), en los cuales se aprecian que el grado de error obtenido es de 0.5°C como máximo para el diseño presentado.



CAPITULO 4

EVALUACIÓN DE COSTOS Y RESULTADOS DEL DISEÑO PRESENTADO

4.1. Pruebas y resultados del sistema diseñado

En base a los circuitos diseñados se elaboraron las tarjetas (Ver anexos) correspondientes a todas las etapas para poder realizar las pruebas y obtener los resultados y en base a ello analizar el diseño presentado.

4.1.1 Pruebas y resultados con la etapa de sensado y acondicionamiento de señal

Se realizaron las pruebas correspondientes a la etapa de sensado y acondicionamiento de señal, mediante el uso de un termómetro calibrado por indecopi el año 2009 en conjunto con el uso de un baño térmico propiedad del laboratorio de energía, para medir el rango de temperaturas desde 21°C hasta los 80°C y para las temperaturas desde 21°C hasta -20°C rango se utilizó un Termómetro digital marca Hanna.

Para verificar el correcto funcionamiento de la etapa de sensado y acondicionamiento de señal, se introdujo la termocupla en el baño térmico, el cual se encontraba a una temperatura de 21.7°C y se fue elevando dicha temperatura

gradualmente. Los datos vistos en el LCD se registraban cada vez que el termómetro marcaba un grado más a partir de 22°C hasta los 80°C. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.1 :

Tabla N° 4.1 Resultados de la etapa de sensado usando termómetro como referencia.

LCD (°C)	Termómetro (°C)	LCD (°C)	Termómetro (°C)	LCD (°C)	Termómetro (°C)
21.3	21.7	41.1	41	62	62
21.5	22	42.1	42	62.9	63
22.3	22.5	43.1	43	64	64
22.6	23	44.1	44	65	65
23.6	24	45.2	45	66.1	66
24.7	25	46.2	46	67.1	67
25.6	26	47.3	47	68	68
26.7	27	48.3	48	69.1	69
27.7	28	49.4	49	70.1	70
28.7	29	50.5	50	71.1	71
29.7	30	51.3	51	72.2	72
30.8	31	52.2	52	73	73
31.8	32	53.1	53	74.1	74
32.8	33	54	54	75	75
33.8	34	55.2	55	76	76
34.8	35	56.2	56	77	77
35.8	36	57.1	57	78	78
36.8	37	58.2	58	79.1	79
37.9	38	59.1	59	80.1	80
39.1	39	60.1	60	81.1	81
40	40	61.1	61		

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en la tabla anterior que el máximo error es de 0.5 cuando el termómetro marca 22°C y 50°C , mientras que el mínimo error es 0°C en más de una lectura.

Para medir temperaturas que estén debajo de la temperatura ambiente al no contar con un termómetro para el rango de temperaturas negativas deseado ni con un equipo en el que se pueda bajar la temperatura gradualmente hasta llegar a -20°C, se optó por colocar dos termocuplas tipo K dentro de un bloque de hielo al cual se les hicieron dos agujeros en el centro y a una distancia de aproximadamente 1cm para poder colocar las termocuplas. Luego de ello se llenaron con un poco de agua dichos agujero y se introdujo todo dentro de una cámara de refrigeración para que se congele el agua dentro de los agujeros que contenian las termocuplas. Una vez

que se obtuvo el bloque de hielo con las termocuplas dentro del mismo (ver figura 4.1.a), se inició la toma de datos. Para ello se le agregaba pequeñas cantidades de agua al recipiente para que se descongele pero lentamente de tal manera que se pueda apreciar cada vez que la temperatura subía un grado en el termómetro digital (ver figura 4.1. b), momento en el cual se anotaba el valor obtenido por nuestro circuito de acondicionamiento.

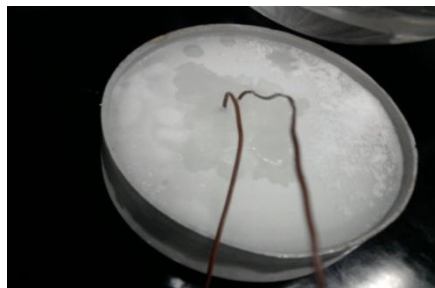


Figura. 4.1(a)

Figura 4.1(b)

Imágenes de las pruebas y resultados de la etapa de sensado

Con el método arriba mencionado, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4.2 :

Tabla N° 4.2 Resultados de la etapa de sensado utilizando termómetro digital como referencia.

Display (°C)	LCD (°C)	Display (°C)	LCD (°C)
-20.4	-20.3	1	1.3
-19	-19	2	2.1
-18	-18.3	3	3.1
-17	-17.3	4	4.1
-16	-16.2	5	5.2
-15	-15.3	6	6.2
-14	-14.4	7	7.1
-13	-13.4	8	8.3
-12	-12.4	9	9.2
-11	-11.2	10	10.1
-10	-10	11	11.1
-9	-9.3	12	12.2
-8	-8.3	13	13.2
-7	-7.3	14	14.1
-6	-6.4	15	15.2
-5	-5.5	16	16.1
-4	-4.5	17	17.2
-3	-3.3	18	18.2
-2	-2.2	19	19.3
-1	-1	20	20.3
0	0	21	21.3

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que el error máximo en esta prueba es de 0.5 y al igual que en el caso anterior solamente se da en dos temperaturas, las de -4°C y -5°C , lo cual es un indicador de que con el diseño propuesto para la etapa de acondicionamiento, se puede reducir el grado de error que presenta la termocupla.

4.1.2. Pruebas y resultados con las resistencias

Con la finalidad de obtener la función de transferencia de la planta, se realizaron pruebas con las resistencias calefactoras, variando la potencia de las mismas en pasos establecidos. Esto se logró utilizando el detector de cruce por cero y variando el tiempo transcurrido para la activación del Triac inmediatamente después de ocurrido el cruce por cero. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la tabla 4.3 :

Tabla N° 4.3 Potencias obtenidas variando tiempo de disparo

Tiempo (ms)	Potencia (Watts)
6.72	85
6.08	180.5
5.44	300
4.8	580
4.16	820
3.52	1030
2.88	1350
2.24	1570
1.6	1830

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que mientras menor sea el tiempo en el que se realice el disparo, mayor es la potencia de las resistencias calefactoras.

Una vez que se verificó que el circuito de control de potencia funcionaba correctamente se procedió a registrar la temperatura dentro de la cámara para diferentes valores de tiempo de disparo, lo que implica diferentes valores de potencia. Las tablas 4.4 y 4.5 muestran los valores obtenidos al realizar las pruebas para un tiempo de disparo de 3.52 ms y 1.6 ms respectivamente.

Tabla N° 4.4 Variación de la temperatura en el tiempo para un tiempo de disparo de 3.52 milisegundos

t de disparo (ms)	3.52
tiempo (s)	T (°C)
0	31.3
30	37.5
60	43.7
90	47.6
120	50.7
150	53.6
180	56.4
210	58.3
240	60.2
270	62
300	62.8
330	64.5
360	65.1

Fuente: Elaboración propia

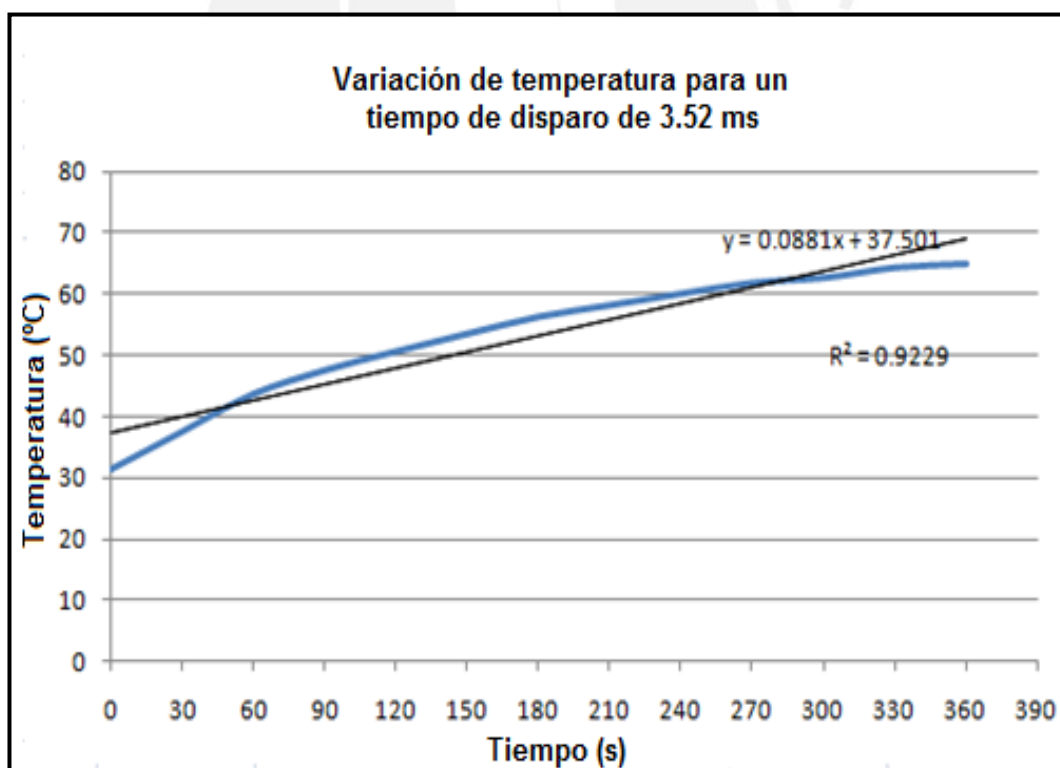


Figura 4.2 Evolución de la temperatura en el tiempo para un tiempo de disparo de 3.52 milisegundos.

Como se puede apreciar en la gráfica mostrada en la figura 4.2, para una potencia de 1030 W la temperatura tiende a subir a una velocidad promedio de 0.08°C/s.

Tabla N° 4.5 Variación de la temperatura en el tiempo para un tiempo de disparo de 1.6 milisegundos

t de disparo (ms)	1.6
tiempo (s)	T (°C)
0	28
30	36.9
60	47.9
90	53.7
120	61.8
150	66.3
180	72.2
210	76.2
240	80

Fuente: Elaboración propia

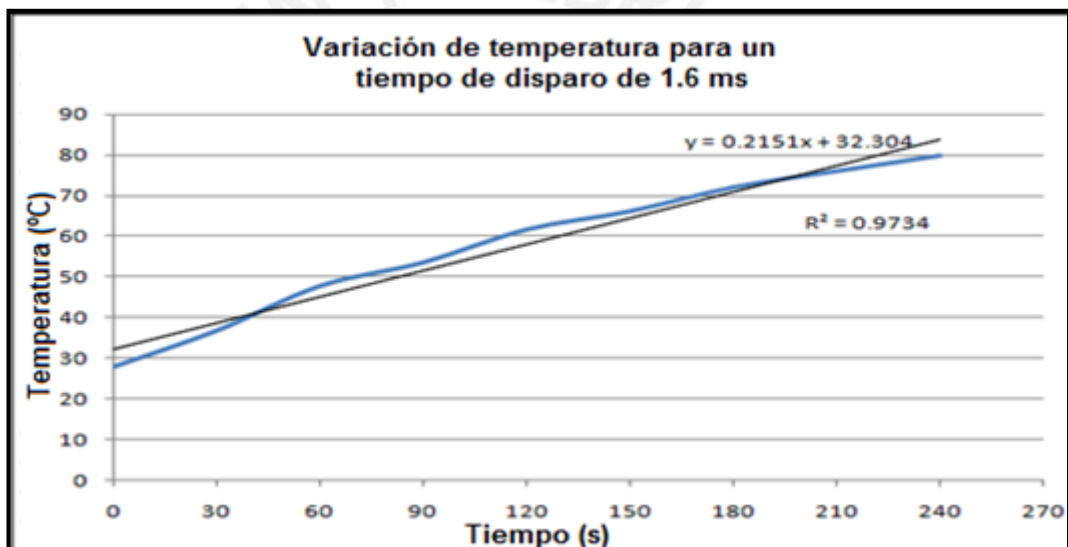


Figura 4.3 Evolución de la temperatura en el tiempo para un tiempo de disparo de 1.6 milisegundos.

La figura 4.3 nos muestra que para una potencia de 1830 W la temperatura sube con una velocidad de 0.2°C/s. Estos resultados nos muestran que al tener un sistema adiabático la temperatura siempre tenderá a subir sea cual sea la potencia a la cual trabajen las resistencias, sin embargo, lo que si se puede variar es la velocidad con la que sube la temperatura dentro de la cámara.

4.1.3. Pruebas y resultados con la válvula de expansión

Se realizaron las pruebas con el circuito de control de la válvula y el circuito de encendido/ apagado del compresor en conjunto. Por recomendación del fabricante de la válvula de expansión electrónica marca Danffos, el periodo de la señal PWM con la que trabajó la válvula, fue de 6 segundos. Se iniciaron las pruebas con un

duty cycle de 100%, lo cual nos indica que la válvula permanecerá completamente abierta. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.6 :

Tabla N° 4.6 Valores de la temperatura en el tiempo para un Duty cycle de 100%

Duty Cycle	100%	Duty Cycle	100%
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	23	22	-10.9
1	22	23	-11.7
2	20	24	-12.2
3	17.2	25	-12.9
4	14.2	26	-13.3
5	12.5	27	-13.7
6	9.2	28	-14.1
7	7.8	29	-14.4
8	6.2	30	-14.7
9	4.7	31	-14.9
10	3.3	32	-15.1
11	1.8	33	-15.3
12	0.5	34	-15.4
13	0	35	-15.4
14	-0.5	36	-15.5
15	-2.5	37	-15.5
16	-4.3	38	-15.7
17	-5.5	39	-15.7
18	-7	40	-15.7
19	-8	41	-15.8
20	-9.2	42	-15.9
21	-10	43	-15.9

Fuente: Elaboración propia

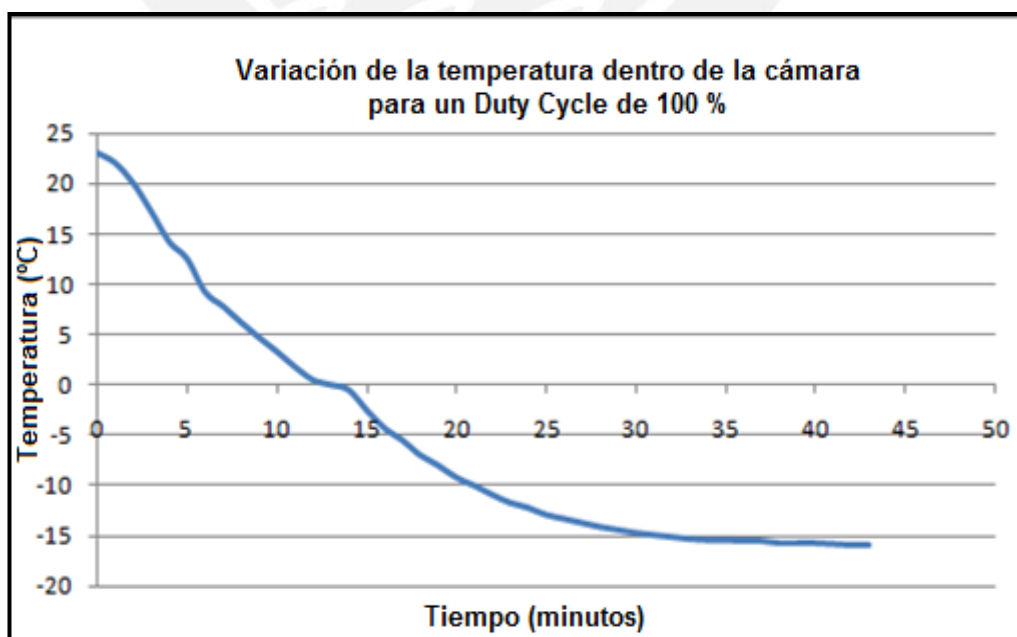


Figura 4.4 Evolución de la temperatura en el tiempo para un duty cycle de 100%

Tabla 4.7 Valores de la temperatura en el tiempo para un Duty cycle de 80%

Duty Cycle	80%	Duty Cycle	80%
Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)
0	-15.9	190	-18.2
10	-16	200	-18.3
20	-16.1	210	-18.4
30	-16.3	220	-18.5
40	-16.5	230	-18.6
50	-16.6	240	-18.7
60	-16.8	250	-18.8
70	-16.9	260	-18.9
80	-17	270	-19
90	-17.1	280	-19.1
100	-17.2	290	-19.3
110	-17.3	300	-19.4
120	-17.4	310	-19.5
130	-17.5	320	-19.6
140	-17.7	330	-19.7
150	-17.8	340	-19.9
160	-17.9	350	-20.1
170	-18	360	-20.2
180	-18.2	370	-20.3

Fuente: Elaboración propia

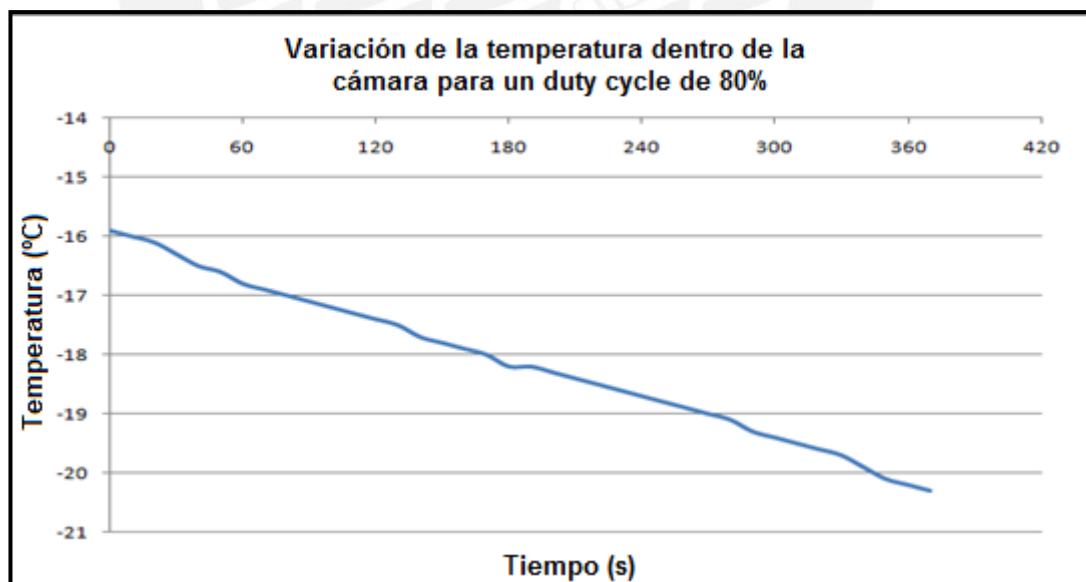


Figura 4.5 Evolución de la temperatura en el tiempo para un duty cycle de 80%

La tabla 4.6 y la figura 4.4 indican que con un duty cycle de 100% la temperatura dentro de la cámara tenderá a ser -16°C , esto se debe a que esa es aproximadamente la temperatura del refrigerante que pasa por el evaporador, que en este caso es la cámara. Al bajar el valor del duty cycle, la temperatura del

refrigerante tiende a ser menor. Por lo tanto cuando se requiere llegar a -20°C es preciso que el duty cycle de la válvula sea de 80% aproximadamente, lo cual se muestra en la tabla 4.7 y en la gráfica 4.5. Cuando se requiere que una temperatura baje pero no hasta llegar a los -16°C , la alternativa más viable es apagar el compresor y cerrar la válvula. Otra posibilidad es encender las resistencias calefactoras para compensar el exceso de calor absorbido, pero esta solución no es eficiente pues se realiza consumo de potencia tanto al trabajar con las resistencias calefactoras, como con el compresor encendido .

4.2. Selección del tipo de control

Luego de analizar los resultados obtenidos al hacer las pruebas variando la potencia de las resistencias y el control de apertura de la válvula para calentar y enfriar respectivamente, se optó por que el tipo de control del sistema sea ON-OFF. Esto implica que al llegar a la temperatura deseada, se apagarán las resistencias calefactoras o se apagará el compresor y se cerrará la válvula de expansión según sea el caso requerido. Al tratarse de una cámara adiabática, al llegar a una temperatura determinada dentro de la misma, esta debería mantenerse durante buen tiempo al no existir flujo de calor desde ni hacia el exterior de la cámara, por lo cual se consideró que el tipo de control elegido es suficiente para lograr controlar la temperatura dentro de la cámara.

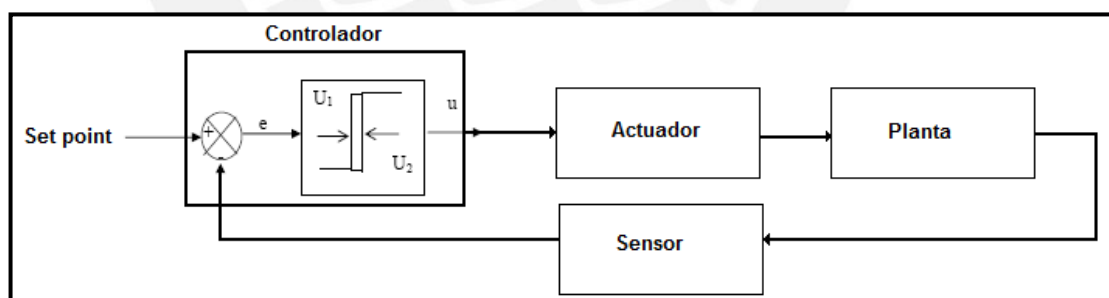


Figura 4.6 Modelo del controlador on-off

La figura 4.6 muestra el diagrama de bloques del sistema incluyendo el controlador On-Off, el cual además poseerá una banda de manejo de histéresis.

4.3. Resultados finales

En esta parte se muestran los resultados obtenidos para dos valores dentro del rango de funcionamiento del sistema, debido a que por lo general el sistema parte desde la temperatura ambiente (25°C aprox.) se escogió un valor por encima (40°C) y otro por debajo (0°C) de dicha temperatura con lo cual se podrán apreciar los

resultados del control utilizando las resistencias y la válvula de expansión electrónica.

Ensayo a 40°C:

En este ensayo se introdujo el valor de 40°C como set point, partiendo de una temperatura de 23.4°C, los resultados de este ensayo se muestran en la tabla 4.8:



Figuras 4.6 a, b y c Interfaz de usuario

En la figura 4.6 (a) se muestra el instante en que se ingresa la temperatura de 40°C, en las figuras 4.6 (b) y (c) se muestran respectivamente los valores de la temperatura dentro de la cámara un minuto y diez minutos después de haber alcanzado el valor deseado.

Tabla N° 4.8 Valores de la temperatura en el tiempo para un ingreso de 40°C

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
0	23.3	230	40.8	460	40.3
10	25.1	240	39.3	470	40.4
20	28.1	250	40.9	480	40.4
30	32.8	260	41	490	40
40	35.6	270	40	500	41.1
50	40.5	280	40.2	510	40.1
60	41.1	290	41	520	40.2
70	40.2	300	40	530	39.9
80	38.9	310	40	540	40.1
90	39.6	320	40.4	550	40.4
100	40	330	40.2	560	40.3
110	40.4	340	39.9	570	41.2
120	40.8	350	40.8	580	40.9
130	40.2	360	40.3	590	40.3
140	39.6	370	40.1	600	40.9
150	40.2	380	41	610	40.8
160	40.3	390	39.8	620	40.5
170	39.9	400	39.9	630	40.2
180	40.6	410	40.7	640	39.7
190	40.7	420	40.7	650	39.9
200	40	430	40.3	660	40.5
210	40.3	440	41.1		
220	40.2	450	39.9		

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.8 se aprecia que el tiempo que se tardó en alcanzar el valor de temperatura deseado dentro de la cámara es de 50 segundos. Además se aprecia que el error máximo es de 1.1 °C.

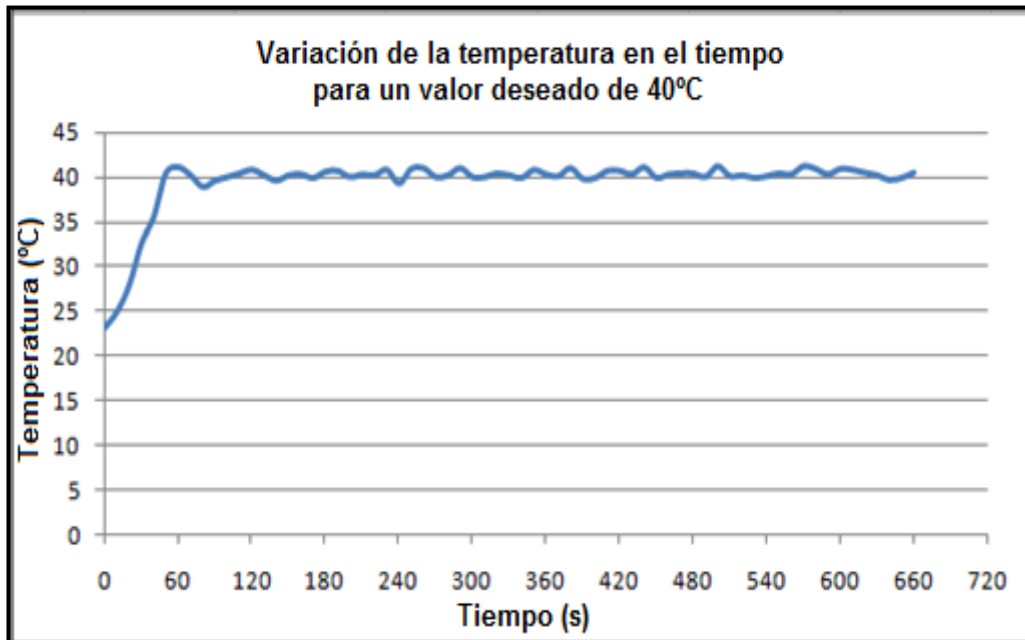


Figura 4.7 Evolución de la temperatura en el tiempo para un ingreso de 40°C

La figura 4.7 muestra que se llega al valor deseado, en nuestro caso 40°C, luego de lo cual trata de mantenerse en dicho valor pero con una pequeña oscilación con picos de 1.1°C como máximo por encima o por debajo del valor deseado.

Ensayo a 0°C:

En este ensayo el setpoint fue de 0°C para verificar el correcto funcionamiento del control cuando se tiene que enfriar el interior de la cámara. Para bajar los valores de temperatura al interior de la cámara, se tiene que hacer uso del control de la válvula de expansión electrónica y del encendido del compresor, una vez llegada a la temperatura deseada el compresor se debe apagar y cerrar la válvula de expansión. Una vez que la temperatura suba por encima del valor deseado, el compresor debería volver a ser encendido y se debería controlar nuevamente la válvula de expansión para volver a bajar nuevamente el valor de la temperatura hasta el valor deseado. Debido a que al apagar el sistema de refrigeración el valor de temperatura no deja de bajar instantáneamente ni enfría instantáneamente al encender, se incluyen márgenes de temperatura para el encendido y apagado del compresor, en este caso se aplicaron +/- 0.3°C al valor deseado para obtener dichos márgenes. La tabla 4.9 muestra los valores obtenidos dentro de la cámara

partiendo desde una temperatura de 32°C hasta llegar a la temperatura deseada de 0°C.

Tabla N° 4.9 Valores de la temperatura en el tiempo para un ingreso de 0°C

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
0	32	240	22.8	470	15.8	700	9.9	940	4.3
10	32	250	22.5	480	15.6	710	9.6	950	4
20	32	260	22.1	490	15.3	720	9.4	960	3.8
30	32	270	21.9	500	14.9	730	9.2	970	3.6
40	31.9	280	21.6	510	14.8	740	8.9	980	3.4
50	31.7	290	21.2	520	14.5	750	8.7	990	3.2
60	31.3	300	20.8	530	14.3	760	8.4	1000	3
70	30.8	310	20.5	540	14	770	8.2	1010	2.7
80	30.3	320	20.2	550	13.7	780	8.1	1020	2.5
90	29.8	330	19.9	560	13.4	790	7.8	1030	2.3
100	29.2	340	19.5	570	13.1	800	7.5	1040	2.1
110	28.6	350	19.2	580	12.8	810	7.3	1050	1.9
120	28	360	19	590	12.6	820	7.2	1060	1.7
130	27.5	370	18.7	600	12.4	850	7	1070	1.5
140	27	380	18.5	610	12.1	840	6.7	1080	1.2
150	26.6	390	18.1	620	11.8	860	6.5	1090	0.9
160	26.1	400	17.8	630	11.6	870	6.2	1100	0.7
170	25.7	410	17.5	640	11.4	880	6	1110	0.5
180	25.3	420	17.3	650	11.2	890	5.7	1120	0.2
190	24.9	430	16.9	660	10.9	900	5.4	1130	0
200	24.5	440	16.6	670	10.6	910	5.2	1140	-0.1
210	24	450	16.3	680	10.3	920	4.9	1150	-0.3
220	23.5	460	16	690	10.1	930	4.5	1160	-0.5
230	23.2								

Fuente: Elaboración propia

La temperatura bajó en aproximadamente 18 minutos desde 32°C hasta los 0 °C, luego de lo cual se intentó mantener en dicha temperatura. La tabla 4.10 y la figura 4.8 muestran cómo varía la temperatura al ejercer el control ON/OFF.

Tabla N° 4.10 Valores de temperatura una vez alcanzado el valor deseado (0°C)

t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)
0	-0.5	190	-0.4	370	-0.1
10	-0.3	200	-0.5	380	-0.2
20	-0.2	210	-0.6	390	-0.4
30	-0.1	220	-0.6	400	-0.5
40	0	230	-0.5	410	-0.6
50	0.1	240	-0.3	420	-0.5
60	0.2	250	-0.2	430	-0.4
70	0.3	260	-0.1	440	-0.3
80	0.4	270	0	450	-0.1
90	0.5	280	0.1	460	0
100	0.5	290	0.2	470	0.1
110	0.4	300	0.3	480	0.2
120	0.3	310	0.4	490	0.3
130	0.2	320	0.5	500	0.4
140	0.1	330	0.4	510	0.5
150	0	340	0.3	520	0.6
160	-0.1	350	0.2	530	0.7
170	-0.2	360	0	540	0.8
180	-0.3				

Fuente: Elaboración propia

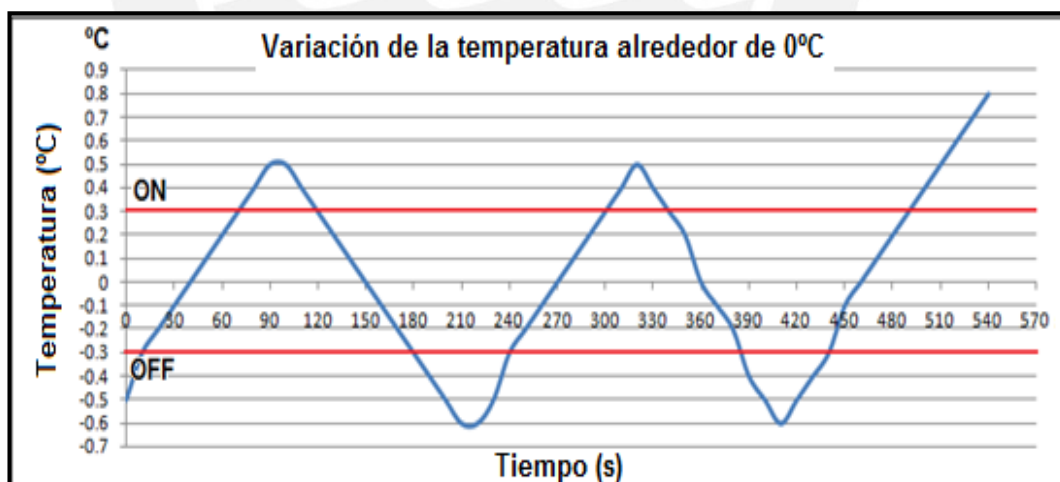


Figura 4.8 Variación de la temperatura alrededor del valor deseado (0°C)

La figura 4.8 muestra como trata de mantenerse la temperatura dentro del rango establecido, este ensayo se realizó en 6.5 minutos solamente con la finalidad de proteger el compresor del módulo de refrigeración, el cual no se encuentra mecánicamente preparado para ser encendido y apagado en tiempos cortos. La estructura de dicho compresor no tiene un soporte fijo debido a que se usa con fines educativos.

4.4. Costos

Los costos de los insumos empleados para la implementación del diseño presentado, en la cámara del laboratorio de energía, se muestran en la tabla 4.11:

Tabla N° 4.11 Costos de los componentes del sistema

Cant.	Componente	Precio (S/.)
1	LCD TS1620G-1 V1.1	36
1	Teclado Matricial	7
1	AD 595ADZ	80
2	Potenciómetro de precisión	1
22	Resistencias de 1/4 w	1.1
6	Resistencias de 1/2W	1.2
2	Resistencias de 1W	0.6
8	Condensadores electrolíticos	1.6
10	condensadores cerámicos	1
15	Borneras	7.5
4	Molex	2
3	Sockets	3
4	Diodos 1N4007	3.6
3	Opto-acopladores MOC3021	12
1	Triac BTA 41600 B	16
2	Triacs BT136 300	16
2	Fusibles de 1 A	1
1	Transformador 15 - 0 - 15 de 2 A	40
	Total	230.6

Fuente: Elaboración propia

En los costos mostrados en la tabla 4.11 no se ha incluido el precio de la cámara, resistencias calefactoras , termocuplas, etc., pues estos elementos fueron proporcionados por el laboratorio de energía de la PUCP.

CONCLUSIONES

Una vez finalizado el diseño del sistema de control de temperatura para la cámara adiabática del laboratorio de energía y luego de haber realizado las pruebas necesarias, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- 1- El uso de una etapa de acondicionamiento de la señal proporcionada por la termocupla permite aprovechar mejor el uso de ADC del Atmega8; motivo por el cual se logró mostrar la temperatura con una resolución de 0.1°C trabajando dentro del rango de -20°C a 80°C . Ver tablas 4.1 y 4.2.
- 2- El uso de un offset en el acondicionamiento de la señal proveniente de la termocupla permite además de minimizar el error que esta presenta. Ver tablas 4.1 y 4.2.
- 3- El uso de las resistencias calefactoras y el del sistema de refrigeración permiten llegar a los valores límite de temperatura dentro del rango que se desea controlar. Ver tablas 4.5, 4.6 y 4.7.
- 4- El microcontrolador Atmega8 fue suficiente para manejar correctamente los módulos diseñados, es decir, trabajar con la interfaz de usuario (Teclado y LCD), los módulos de enfriamiento, calentamiento y el acondicionamiento de señal.
- 5- El uso adecuado de etapas de aislamiento eléctrico permitió trabajar con normalidad los tres circuitos de potencia con los que se cuenta (Control de resistencia, Válvula y encendido del compresor), sin poner en riesgo ni dañar la parte de control, cuyo componente principal es el microcontrolador Atmega8, esto se logró con el uso de optoacopladores.
- 6- Se logró que el usuario pueda establecer una temperatura a la cual deba llegar el interior de la cámara, con el uso de una interfaz que permite el ingreso de dicha temperatura.
- 7- El diseño propuesto permite realizar el control de temperatura dentro de la cámara con un error de $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$. Ver tablas 4.8 y 4.10.

RECOMENDACIONES

- Para poder realizar un mejor y óptimo control de temperatura a implementarse en la cámara adiabática, es necesario utilizar otro sistema de refrigeración que no sea el modulo educativo, cuyo tipo de compresor no ayuda a realizar un control de temperatura eficiente, pues no está hecho para ser encendido y apagado en periodos de tiempo breves.
- Se debe realizar un mantenimiento a la cámara debido a que durante las pruebas realizadas al elevar la temperatura dentro de la misma, se notó el desprendimiento de la pintura en una de las paredes interiores de la cámara.
- Se recomienda verificar cuan adiabática es la cámara y/o aumentar el grado de tal característica, pues durante los ensayos se observó que la temperatura no se mantenía durante un periodo prolongado de tiempo, lo cual no facilitó la tarea de control.
- Se recomienda incluir detector de apertura de puerta para detener el ensayo en caso se abra la puerta de la cámara durante el desarrollo del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASSOCIATED ENVIROMENTAL SYSTEM.
Temperature test chambers [en línea]. Florida. [Consultado 2011/01/23]
< <http://www.associatedenvironmental-bma.com/pdf/sd-500.pdf>>
2. ATMEL CORPORATION.
Atmega8 parameters [en línea]. [Consultado 2011/02/14]
<http://www.atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=2004&category_id=163&family_id=607&subfamily_id=760>
3. BIEL, Domingo et al.
2001 Instrumentación virtual. Adquisición, procesado y análisis de señales.
Primera edición.
Barcelona: Fondo editorial de la UPC.
4. Centro de innovación Tecnológica del Cuero, Calzado e Industrias Conexas.
Tarifas de servicios a terceros [en línea]. Lima. [Consultado 2010/12/10]
<http://www.cites.pe/uploads/citeccal_tarifa2010.pdf>
5. Design Enviromental Company.
Temperature test chambers [en línea]. Reino Unido. [Consultado 2011/01/23]
< <http://www.designenvironmental.co.uk/products/1-bs.php>>
6. FINK, Donald et al.
1981 Manual Práctico de electricidad para ingenieros. 11ra Edición.
Barcelona: Editorial Reverté. Tomo 1.
7. GROOVER, Mikell P.
1997 Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. Primera Edición.

Naucalpan de Juárez (México): Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

8. GÁMIZ, Juan Ángel.
2000 Control de sistemas de aire acondicionado. Primera Edición.
Barcelona: Grupo editorial Ceac.
9. HERNÁNDEZ, Eduardo
2005 Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración
Balderas (México): Editorial Limusa S.A.
10. INSTRUMENTACIÓN
s/a Guía de Laboratorio de Energía. Material de enseñanza.
Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias
e Ingeniería.
11. JOHANNES, Karl
2010 A Concise Introduction to Additives for Thermoplastic Polymers.
Estado Unidos: Scrivener Publishing.
12. LACALLE, J.M et al.
1997 Termodinámica
Editorial Sección de Publicaciones de la E.T.S.I.I
13. MATAS, José A. y RAMOS, Rafael R.
2001 Microcontroladores MCS-51 y MCS-251
Barcelona: Fondo editorial UPC.
14. MANDADO, Enrique et al.
2007 Microcontroladores PIC: sistema integrado para el autoaprendizaje.
Barcelona: MARCOMBO
15. MICROCHIP COMPANY.
Microcontrollers parameters [en línea]. [Consultado 2011/02/14]
<<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en553452>>

16. OGATA, Katsuhiko
2003 Ingeniería de Control Moderna. Cuarta Edición.
México D.F : Prentice Hall.
17. PITA, Edward G.
1992 Principios y sistemas de refrigeración. Primera edición.
México: Editorial Limusa S.A.
18. REFRIGERACIÓN
s/a Guía de Laboratorio de Energía. Material de enseñanza.
Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias
e Ingeniería.
19. ROLLE, Kurt C
2006 Termodinámica. Sexta Edición.
México D.F: Pearson Educación.
20. ZEMANSKY, Sears
2004 Física Universitaria. 11a ed.
Atlacomulco (México): Pearson Education. Volumen 1.