



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



ITESCA[®]
Instituto Tecnológico
Superior de Cajeme

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE CAJEME

**INTERFAZ DINÁMICA DE UN SISTEMA DE
REFRIGERACIÓN DIDÁCTICO PARA
ANÁLISIS EXTENSOMÉTRICO EN
MATERIALES AERONÁUTICOS**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

PRESENTA

ING. LUZ NATALY FLORES ARMENDÁRIZ

DI. JUAN JOSÉ DELFÍN VÁZQUEZ

Ciudad Obregón, Sonora, México

FEBRERO 2022

DEDICATORIA

A MI ESPOSO: Por el gran apoyo que me ha dado al concluir este ciclo de nuestras vidas, realmente agradezco todos los consejos que me dio y la paciencia que me tuvo durante la maestría.

A MI DIRECTOR DE TESIS: El Dr. Juan José Delfín Vázquez ya que, sin su ayuda, en el momento más difícil de este proceso, no hubiera sido posible que yo culminara mi maestría, además de siempre confiar en mi incluso cuando yo misma no lo hacía.

A MIS PADRES Y HERMANO: Por darme todo lo que necesite durante el tiempo que viví con ellos ya que la conjunción de todas las experiencias que pase a su lado me llevaron hasta donde estoy ahora.

A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO: Por su amistad y el apoyo brindado a través de mis estudios.

AGRADECIMIENTOS

A MIS MAESTROS DE POSGRADO: Por su paciencia, por toda la sabiduría, su experiencia y el conocimiento que nos brindaron.

A MIS ASESORES: Dr. Juan José Delfín Vázquez, Dr. José Efrén Ruelas Ruiz y Dr. Baldomero Lucero Velázquez, por el apoyo y dedicación en la elaboración de este proyecto. Gracias por su sabiduría y paciencia.

A MIS COMPAÑEROS DE POSGRADO: Gracias por permitirme conocerlos y por compartir este logro lleno de esfuerzos y sacrificios.

A ITESCA: Por hacer posible la maestría en Mecatrónica.

A CONACYT: Por hacer posible la realización de mis estudios.

A MI ESPOSO E HIJOS: Por su apoyo incondicional y estar en todo momento a mi lado.

ABSTRACT

The present work of thesis, shows the development of the interface for the control of a system of refrigeration capable of maintaining temperatures programmed by the materials analyst (the student), which provides graphical information of the micro deformations of the material to be analyzed Through electrical extensometer, to simulate the conditions to which the material is subjected aeronautical. It also shows the thermal behavior of the different components that integrate the refrigeration system, by means of temperature sensors, for the learning of the students.

The project is composed of four chapters, the first chapter describes the problems existing with the current didactic refrigeration system, include the objectives that are desired fulfill when analyzing the project, as well as the benefits and the place where it developed. The second chapter summarizes the basic concepts necessary for the development of the draft. Addressing several topics such as refrigeration, thermodynamics, Arduino, LabVIEW and electronic control. In addition, it establishes the modality of research, types of research carried out for the development of the project, how they were processed and analyzed the data.

The third chapter establishes the activities carried out for the development of the project, the proposed solution to the problem is developed, and the objectives are solved established, system requirements and shows the development and operation of the prototype. Finally, in the fourth chapter the conclusions and recommendations are shown.

RESUMEN

El presente trabajo de tesis, muestra el desarrollo de la interfaz para el control de un sistema de refrigeración capaz de mantener temperaturas programadas por el analista de materiales (el alumno), el cual provee información gráfica de las micro deformaciones del material a analizar mediante extensometría eléctrica, para simular las condiciones a que está sometido el material aeronáutico. Además, muestra el comportamiento térmico de los diferentes componentes que integran el sistema de refrigeración, mediante sensores de temperatura, para el aprendizaje de los alumnos.

El proyecto está compuesto de cuatro capítulos, en el primer capítulo se describen los problemas existentes con el actual sistema de refrigeración didáctico, se incluyen los objetivos que se desean cumplir al finalizar el proyecto, así como los beneficios y el lugar donde se desarrolló el mismo. En el segundo capítulo se resumen los conceptos básicos necesarios para el desarrollo del proyecto. Abordando varios temas como: refrigeración, termodinámica, Arduino, LabVIEW y electrónica de control. Además, se establece la modalidad de investigación, tipos de investigaciones realizadas para el desarrollo del proyecto, como fueron procesados y analizados los datos.

En el tercer capítulo se establecen las actividades realizadas para el desarrollo del proyecto, se desarrolla la propuesta de solución para el problema planteado, se resuelven los objetivos establecidos, requerimientos del sistema y se muestra el desarrollo y funcionamiento del prototipo. Finalmente, en el cuarto capítulo se muestran las conclusiones y recomendaciones.

Tabla de Contenidos

Capítulo I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Enunciado del problema	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Alcances y limitaciones	5
1.5.1 Alcances	5
1.5.2 Limitaciones	6
Capítulo II MARCO CONCEPTUAL	7
2.1 Fundamentos de Referencia	7
2.2 Aplicación de la refrigeración	8
2.3 Componentes de un sistema de refrigeración	9
2.4 Software para simulación. Entorno LabVIEW	10
2.4.1 Panel Frontal	12
2.4.2 Diagrama de Bloques	13
2.5 Arduino	15
2.5.1 Arduino uno	16
2.5.2 Arduino Mega 2560	18

2.6. Técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable.....	18
2.6.1. Técnicas para análisis experimentales	19
2.6.2. Técnicas experimentales para medir deformaciones térmicas.....	20
2.6.3 Usos de la técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable	21
2.7. Coeficientes de expansión térmica (CET)	22
2.7.1. CET en materiales metálicos	22
2.7.2. CET en materiales compuestos metálicos simétricos	23
Capítulo III DESARROLLO	25
3.1 Instrumentación de componentes electrónicos del sistema	26
3.1.1 Sensores	26
3.1.2 Actuadores	29
3.1.3 Diagrama de conexión	30
3.2 Desarrollo del Sistema de Refrigeración Didáctico.....	31
3.2.1 Programa de control del sistema de refrigeración didáctico.....	35
3.3 Pruebas experimentales térmicas para determinar coeficientes de expansión térmica.....	38
3.3.1 Equipos y materiales para las pruebas	39
3.3.2 Metodología usada para las pruebas	42
3.3.3 Datos obtenidos de las pruebas experimentales.....	42
Capítulo IV RESULTADOS.....	47
4.1. Resultados relacionados con el Sistema de Refrigeración Didáctica	47
4.1.1. Interfaz Usuario máquina para el control de temperatura.....	47
4.1.2. Gráficas del evaporador	50

4.1.3. Gráficas del Condensador	52
4.1.4 Graficas de las temperaturas: ambiente, interior de la cámara y diferencia entre ambas	54
4.2. Resultados de las pruebas térmicas experimentales con diferentes materiales.....	55
4.2.1. CET resultantes de la prueba 1	57
4.2.2. CET resultantes de la prueba 2	58
4.2.3. Análisis de Resultados	61
Capítulo V Conclusiones y recomendaciones.....	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Recomendaciones	64
Referencias.....	65

Lista de tablas

Tabla 2.1. Componentes del Sistema de Refrigeración	10
Tabla 2.2. Característica de Arduino Uno.	17
Tabla 3.1. Ubicación y función de sensores en el sistema de refrigeración	29
Tabla 3.1. Datos experimentales obtenidos en la prueba 1	43
Tabla 3.2. Datos experimentales prueba 2, obtenidos en la MRD.....	45
Tabla 4.1. Prueba 1, CET resultantes de materiales de FC y plástico	57
Tabla 4.2. Deformación promedio resultante de la prueba 2.....	59
Tabla 4.3. Prueba 2, resultado CET aluminio.....	61
Tabla 4.4. Coeficientes de Expansión Térmica Resultantes pruebas 1 y 2.....	61
Tabla 4.5. CET experimentales y de las bases de datos.....	62

Lista de figuras

Figura 2.1: Diagrama de un sistema de refrigeración	9
Figura 2.2. Panel Frontal.....	12
Figura 2.3. Diagrama de bloques	14
Figura 2.4. Librerías Panel frontal	14
Figura 2.5. Librerías Panel Block Diagram	15
Figura 2.6. Placa Arduino Uno	17
Figura 2.7. Placa Arduino Mega 2560.....	18
Figura 2.8. Equipo utilizado para la técnica de fotoelasticidad	20
Figura 2.9. Técnica de Extensometría Eléctrica de Resistencia Variable.....	20
Figura 2.10. Extensómetros eléctricos usados en mediciones de deformación.	21
Figura. 3.1. Sensor LM35	26
Figura. 3.2. Sensor DS18B20	27
Figura. 3.3. Ubicación de Sensores dentro del módulo de refrigeración	28
Figura 3.4. Módulo relé Arduino 4 canales 5v	30
Figura 3.5. Contactor magnético 2 polos 220v	30
Figura 3.6. Diagrama de conexión.....	31
Figura 3.7. Librerías de LabVIEW para control de Arduino	32
Figura 3.8. Programa Lifa Base en Arduino	32
Figura 3.9 Ejemplo de comunicación serial de LabVIEW-Arduino.....	33
Figura 3.10. Programa Cargado en Arduino Uno	34

Figura 3.11. Programación en LabView para la adquisición de datos DS18B20.....	34
Figura 3.12. Programa de control del Sistema de Refrigeración Didáctico.....	35
Figura 3.13. Programa de control parte 1	36
Figura 3.14. Programa de control parte 2	36
Figura 3.15. Programa de control parte 3	37
Figura 3.16. Subrutina “True” de la estructura “case”.....	38
Figura 3.17. Máquina de refrigeración didáctica	40
Figura 3.18. P3-Strain Recorded.....	41
Figura 3.19. Materiales de prueba.....	41
Figura 3.20. Canal para conexión	41
Figura 3.21. Gráfica deformación-temperatura prueba 1.....	44
Figura 3.22. Gráfica Deformación-Temperatura, prueba 2, MRD	46
Figura 4.1 Interfaz de control Usuario-Maquina	48
Figura 4.2. Interfaz de control Usuario-Maquina monitoreada desde Google Chrome.....	49
Figura 4.3. Gráfica de la entrada del evaporador.....	51
Figura 4.4 Gráfica de la salida del evaporador	51
Figura 4.5. Gráfica de la diferencia entre la entrada y la salida del evaporador.....	51
Figura 4.6. Gráfica de la salida del condensador	52
Figura 4.7. Gráfica de la entrada del condensador.....	53
Figura 4.8. Gráfica de la diferencia entre la entrada y salida del Condensador	53
Figura 4.9. Grafica. Temperatura ambiente	54
Figura 4.10. Grafica. Temperatura interior de la cámara de refrigeración	55

Figura 4.11. Grafica. Diferencia entre temperatura ambiente y cámara de refrigeración 55

Figura 4.13. Gráfica cambio de temperatura deformación promedio del aluminio, prueba 2 60

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra el desarrollo de la interfaz para el control de temperatura de un Sistema de Refrigeración Didáctico (SRD). Este sistema tiene la finalidad de ser usado como herramienta de laboratorio para que el alumno pueda analizar las micro deformaciones que sufre un material sometido a temperaturas menores al ambiente. Además, esta interfaz permite al usuario conocer la temperatura en los diversos sistemas que lo integran.

La necesidad de este proyecto surge en el Instituto Tecnológico Superior de Cajeme (ITESCA), el cual, tiene entre sus instalaciones un laboratorio de mecánica. Entre los diversos equipos que integran este laboratorio, se cuenta con un equipo de refrigeración didáctico, sin embargo, este tiene algunas áreas de mejora funcionales, entre ellas, el encendido es un sistema análogo on/off y por partes, una vez encendido el equipo, este comienza a bajar la temperatura sin ningún control, además no cuenta con ninguna interfaz que permita al usuario ingresar la temperatura deseada. Tampoco cuenta con ningún medio visual para observar comportamiento de la temperatura, ni de las micro deformaciones en el material ensayado.

El carácter profesional de este proyecto de tesis, pertenece a la especialidad de control en mecatrónica, ya que aquí se aplican e integran las distintas áreas pertinentes, mismas que son: mecánica, electrónica y sistemas computacionales. Ya que el SRD está diseñado usando las leyes de la termodinámica, se usa la electrónica para controlar la temperatura, y finalmente los sistemas computacionales se utilizan para proveer al usuario de una interfaz de comunicación con el sistema.

1.1 Antecedentes

Uno de los nichos más importantes dentro del campo de conocimientos del Ingeniero Mecánico es el referente al comportamiento de los materiales, las deformaciones, los esfuerzos, las propiedades mecánicas, elásticas, térmicas, entre otras. El análisis de estas propiedades permite al ingeniero tomar decisiones al momento de diseñar elementos mecánicos.

Es por ello que en las universidades e instituciones educativas de nivel superior que imparten esta licenciatura, resulta sumamente importante para el desarrollo de las competencias que la integran, contar con equipamiento tecnológico y prototipos, para que los alumnos y maestros puedan poner en práctica y validar los diseños y aplicaciones de las materias especializadas como mecánica de materiales, refrigeración, control entre otras. La integración de las anteriores disciplinas da como resultado un producto mecatrónico de enseñanza que como menciona Iserman [1] resulta en extremo compleja puesto que exige el conocimiento de la teoría, de los métodos disponibles, de las herramientas computacionales y experimentales de los tres campos primarios que la integran.

Recientemente, han sido desarrolladas varias investigaciones relacionadas con la enseñanza de la mecatrónica, existen diferentes Universidades que han desarrollado métodos didácticos con buenos resultados. La Ingeniería Mecatrónica presenta excelentes condiciones para propiciar en los estudiantes el desarrollo de habilidades de diseño, control, manufactura y negocios. Los robots son un ejemplo esencial como máquinas mecatrónicas, pero también pueden ser procesos industriales altamente automatizados, o incluso un servicio puede ser considerado como un producto mecatrónico [2].

Existen múltiples investigaciones relacionadas con el control de temperatura. Por ejemplo en la tesis de Aguilar [3] se presenta el diseño y la construcción de un digestor anaeróbico constituido por cuatro módulos que poseen un controlador difuso de temperatura que satisface las necesidades de control de un sistema no lineal y variante en el tiempo expuesto a cambios de temperatura no previstos debido a las condiciones climáticas. En el artículo de Alfaya [4] se describe el análisis y control de un ciclo de refrigeración, en el que dos variables de proceso son controladas simultáneamente: La velocidad de giro del compresor y la apertura de la válvula de expansión, incluyendo resultados de simulación del controlador robusto en comparación con un controlador PID descentralizado.

Por otra parte el artículo de Domínguez [5] muestra las posibilidades de desarrollo de un sistema para el control de la temperatura basado en la plataforma Arduino, implementando un sistema que permite la consulta y control de la temperatura ambiente a través de la red de comunicaciones móviles. Bejarano [6] desarrolla un modelado dinámico de sistemas de refrigeración por compresión de vapor, desde un punto de vista simplificado y orientado al control. Desarrollando submodelos matemáticos para cada uno de los componentes del sistema: intercambiadores de calor (evaporador y condensador), compresor de velocidad variable y válvula de expansión electrónica. Obteniendo así modelos básicos útiles para el desarrollo de estrategias de control.

1.2 Enunciado del problema

Actualmente el Instituto Tecnológico Superior de Cajeme (ITESCA) cuenta con un equipo de refrigeración didáctico, sin embargo, este tiene algunas áreas de mejora funcionales,

entre ellas, el encendido es un sistema análogo on/off y por partes, una vez encendido el equipo, este comienza a bajar la temperatura sin ningún control, además no cuenta con ninguna interfaz que permita al usuario ingresar la temperatura deseada. Tampoco cuenta con ningún medio visual para observar el comportamiento de la temperatura, ni de las micro deformaciones en el material ensayado.

Dado un sistema de refrigeración didáctico, se requiere una interfaz que permita el control de la temperatura por el usuario, así como la representación visual de los parámetros que integran el sistema, para lograr un adecuado análisis tanto del comportamiento del material como del sistema y así pueda ser utilizado en las prácticas de las materias pertinentes.

1.3 Justificación

Uno de los aspectos en que se beneficiará al Instituto con la realización de este trabajo, consiste en satisfacer la necesidad del programa de Licenciatura en Ingeniería Mecánica de contar con un equipo adecuado para el ensayo de materiales en temperaturas menores a la temperatura ambiente y asignadas por el alumno.

Otros de los beneficios que se obtendrán con la realización del prototipo, es que este se podrá utilizar e integrar con otras asignaturas afines. También cabe destacar la posibilidad de utilizar el SRD para desarrollar proyectos derivados de él, ya sea mejorando su funcionamiento o agregándole nuevos elementos, lo que permitirá el generar artículos de investigación y proyectos de tesis de licenciatura y maestría a futuro.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Controlar mediante una interfaz dinámica un sistema de refrigeración capaz de mantener temperaturas escalonadas estables programadas por el Analista de materiales (el alumno), el cual provea información gráfica de la temperatura, extensometría eléctrica del material a analizar y los componentes del sistema de enfriamiento, para ello el SRD será controlado mediante el dispositivo electrónico de software libre Arduino y el software LabVIEW.

1.4.2 Objetivos específicos

A continuación, se enlistan los objetivos específicos:

- a) Instrumentar la interfaz para el control del sistema de refrigeración.
- b) Configurar el control para garantizar que las temperaturas sean estables y escalonadas simulando las condiciones a las cuales son sometidos los materiales aeronáuticos.
- c) Generar una interfaz de comunicación entre el analista y el sistema de refrigeración.
- d) Tener un banco didáctico capaz de beneficiar al programa de la licenciatura de Ingeniería Mecánica y así mismo al área de posgrado en Mecatrónica.
- e) Llevar a cabo pruebas experimentales con materiales aeronáutico instrumentados con la técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable.
- f) Obtener las propiedades térmicas de los materiales a temperaturas inferiores a la atmosférica.

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcances

El presente proyecto tiene como alcance lo siguiente:

1. Diseñar una interfaz que permita el control de la temperatura por el usuario, así como la representación visual de los parámetros que integran el sistema.
2. Simular temperaturas por debajo de la temperatura ambiente mediante control electrónico para obtener una temperatura mínima de -25°C .
3. Hacer pruebas de esfuerzos a bajas temperaturas para obtener propiedades térmicas en materiales aeronáuticos mediante extensometría eléctrica.

1.5.2 Limitaciones

Las limitaciones para este proyecto de tesis son las siguientes:

1. Se utilizarían las galgas extensométricas de propósito general.
2. La mínima temperatura a la que podrán observarse las micro deformaciones de los materiales está limitada a la capacidad de la galga que es de -6°C .
3. No se cuenta con recursos suficientes para comprar un equipo de refrigeración nuevo por lo que se utilizara el Modulo de Refrigeración Didáctico (MDR) existente en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica.

Capítulo II

MARCO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se muestran los conceptos y las definiciones de interés relacionados con el marco teórico de este trabajo. También se indican los aspectos generales del desarrollo de la refrigeración y el control, así como los componentes básicos que conforman un sistema de refrigeración. También se dará referencia a las herramientas computacionales que se utilizaron para crear el control y la interfaz del sistema, como es Arduino.

2.1 Fundamentos de Referencia

La refrigeración es el proceso de reducción y mantenimiento de la temperatura (a un valor menor a la del medio ambiente) de un objeto o espacio.

La reducción de temperatura se realiza extrayendo energía del cuerpo, generalmente reduciendo su energía térmica, lo que contribuye a reducir la temperatura de este cuerpo [7]. La refrigeración es el proceso de producir frío, es decir, extraer calor. Para producir frío lo que se hace es transportar calor de un lugar a otro, así, el lugar al que se le sustrae calor se enfría.

La refrigeración implica transferir la energía del cuerpo que se pretende enfriar a otro, aprovechando sus propiedades termodinámicas.

Entre otras formas:

- Aprovechar diferencias de temperaturas entre el medio receptor y emisor.
Transfiriendo el calor por convección, conducción o radiación.

- Usar un proceso que requiera una aportación externa de energía en forma de trabajo como el ciclo Carnot.
- Aprovechar el efecto magneto calórico de los materiales, como en la desimanación adiabática.

2.2 Aplicación de la refrigeración

- La climatización para alcanzar un grado de confort térmico adecuado para la habitabilidad de un edificio.
- La conservación de alimentos, medicamentos u otros productos que se degradan con el calor. Como por ejemplo la producción de hielo o nieve, la mejor conservación de órganos en medicina o el transporte de alimentos perecederos.
- Los procesos industriales que requieren reducir la temperatura de maquinarias o materiales para su correcto desarrollo. Algunos ejemplos son el mecanizado, la fabricación de plásticos, la producción de energía nuclear.
- Motores de combustión interna: en la zona de las paredes de los cilindros y en las culatas de los motores se producen temperaturas muy altas que es necesario refrigerar mediante un circuito cerrado donde una bomba envía el líquido refrigerante a las galerías que hay en el bloque del motor y la culata y de ahí pasa un radiador de enfriamiento y un depósito de compensación, el líquido refrigerante que se utiliza es agua destilada con unos aditivos que

rebajan sensiblemente el punto de congelación para preservar al motor de sufrir averías cuando se producen temperaturas bajo cero.

- Maquinas herramientas: las maquinas herramientas también llevan incorporado un circuito de refrigeración y lubricación para bombear el líquido refrigerante que utilizan que se llama taladrina o aceite de corte sobre el filo de la herramienta para evitar calentamiento excesivo que la pudiese deteriorar rápidamente.

2.3 Componentes de un sistema de refrigeración

Como se indicó anteriormente la refrigeración es un proceso de eliminación de calor. La función e interacción de los componentes de un sistema básico de refrigeración se pueden apreciar en la Figura 2.1, en ella se ilustra cómo, mediante el trasiego de una sustancia refrigerante, se extrae calor de los productos a través de una simple función de intercambio con el aire del exterior [8].

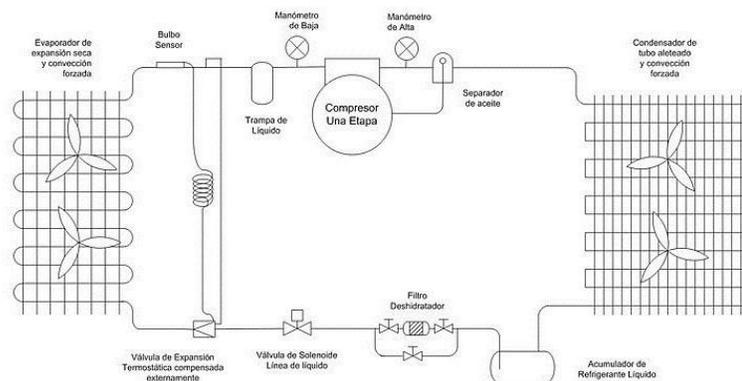


Figura 2.1: Diagrama de un sistema de refrigeración

A continuación se muestra una tabla de los principales componentes de un sistema de refrigeración.

Tabla 2.1. Componentes del Sistema de Refrigeración

<i>Componente</i>	<i>Nombre</i>
1	Tuberías
2	Refrigerante
3	Válvula de expansión térmica
4	Evaporador
5	Compresor
6	Condensador
7	Evaporador

2.4 Software para simulación. Entorno LabVIEW

Con el objetivo de elaborar una interfaz gráfica que muestre los cambios en la temperatura del dispositivo se ha hecho uso del software de instrumentación virtual LabVIEW, el cual por sus características y entorno de programación en ambiente gráfico con una serie de objetos y propiedades definidos permite ejecutar las tareas deseadas para este trabajo.

El desarrollo del modelo de un sistema de manera virtual debe permitir al usuario:

- Proporcionar valores iniciales.

- Supervisar los cambios en la temperatura.
- Analizar los resultados.

Para realizar estas tareas y contar con un diseño altamente configurable, uno de los métodos más viables es el de la programación orientada a objetos (OOP), donde datos y procedimientos se hallan representados en una estructura llamada objeto.

LabVIEW parte de una programación gráfica totalmente diferente a la programación mediante comandos, sistema empleado en los lenguajes de alto nivel tradicionales.

Los programas de LabVIEW son llamados instrumentos virtuales (VI's), en estos programas que funciona como VI, el usuario ve en la pantalla de su computadora un panel cuya función es idéntica a la de un instrumento físico, facilitando la visualización y el control del sistema. A partir de los datos generados en el panel frontal, el VI debe actuar como lo haría el sistema o instrumento real [9, 10].

Cada VI tiene tres partes principales:

- Panel frontal: Donde el usuario interactúa con el VI
- Diagrama de bloques: Código que controla el programa.
- Icono/Conector: Medio para conectar un VI con otro.

Cuando se crea un VI en LabVIEW se trabaja con dos ventanas: Una en la que se implementará el panel frontal, y otra que soportará el nivel de programación.

2.4.1 Panel Frontal

El panel frontal, ver Figura 2.2, es utilizado para que el usuario interactúe con el programa cuando está corriendo. Los usuarios pueden controlar el programa, manipular entradas y ver datos actualizados en tiempo real.

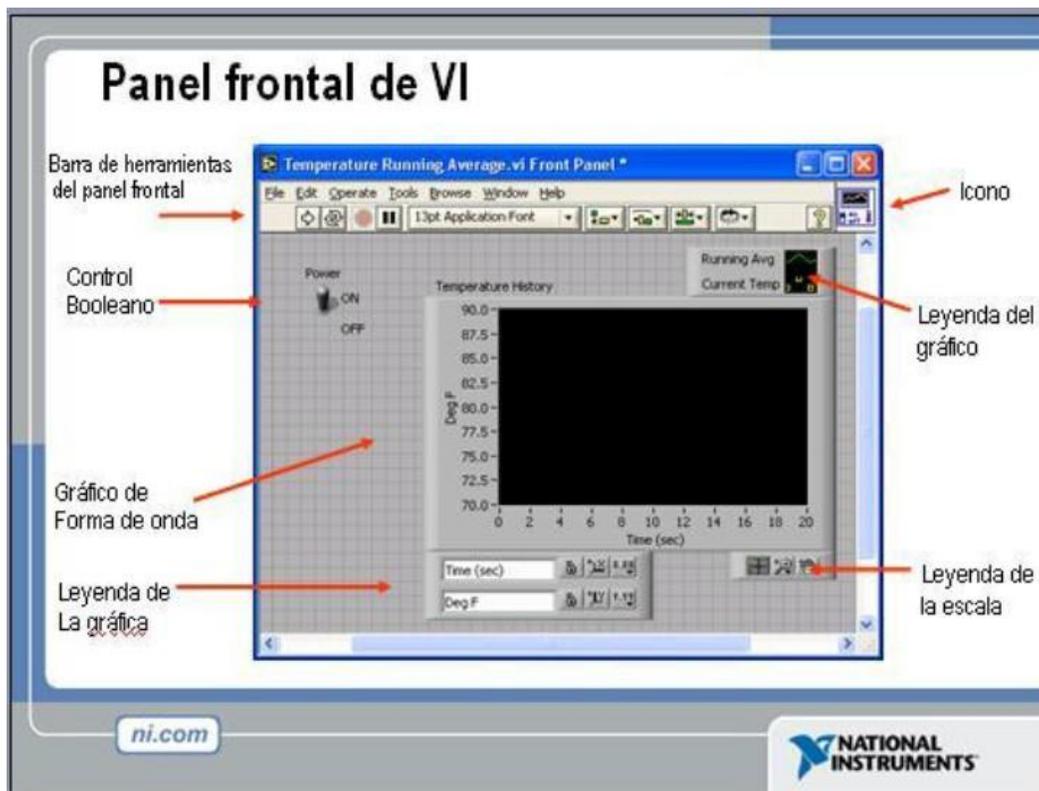


Figura 2.2. Panel Frontal

El panel frontal se construye utilizando controles e indicadores, los cuales son las entradas y salidas que sirven para generar una interacción con las terminales del VI, los controles son botones, marcadores, switch y otros tantos componentes. Los controles tienen la función de simular instrumentos de entrada de equipos electrónicos, neumáticos, etc. Y suministra datos al diagrama de bloques del VI. Los indicadores son salidas de

instrumentos y suministra datos que el diagrama de bloques adquiere o genera. Los indicadores son las gráficas, leds y otros dispositivos.

2.4.2 Diagrama de Bloques

El diagrama de bloques contiene el código fuente gráfico mostrado en la Figura 2.3. Los objetos del panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloques. Adicionalmente, este contiene funciones y estructuras incorporadas en las bibliotecas de LabVIEW. Los cables conectan cada uno de los nodos en el diagrama de bloques, incluyendo controles e indicadores de terminal, estructuras y funciones.

Para la creación del panel frontal se une un control desde las librerías de LabVIEW, de esta manera se crea una variable cuyos valores serán determinados por lo que el usuario determine desde el panel; inmediatamente aparece una terminal en la ventana de programación representándolo. El nivel de programación del VI consistirá en conectar estas terminales a bloques funcionales, con el fin de obtener el resultado a visualizar.

Se puede comparar la ventana de programación con una placa de circuito impreso, donde las terminales del panel frontal se conectan a bloques funcionales (circuito integrado) que se interconectan para generar los datos que se desean visualizar.

El software LabVIEW permite construir una colección de objetos que representan a instrumentos físicos, procedimientos de prueba, procesamiento de datos y elementos de interface gráfico, además existe la posibilidad de construir nuevos objetos a partir de los ya existentes.

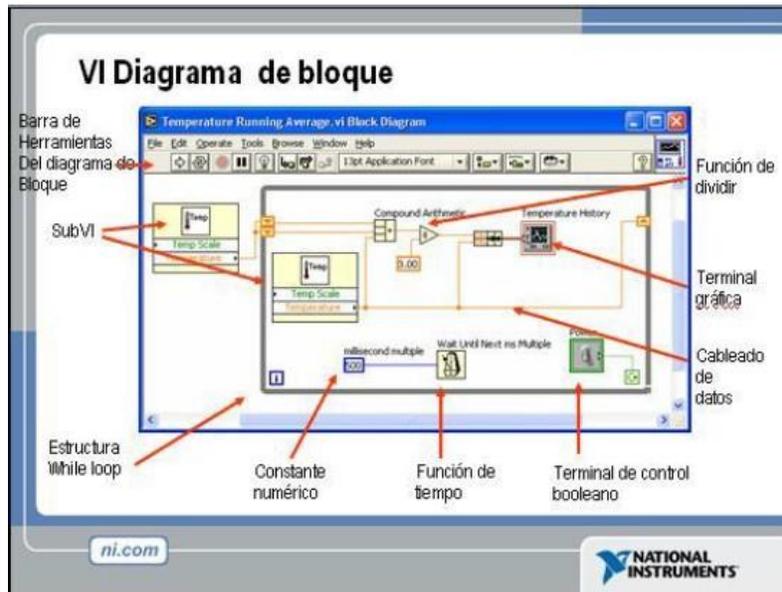


Figura 2.3. Diagrama de bloques

Para poder diseñar un instrumento virtual, LabVIEW contiene paletas de controles y paletas de funciones que muestran las librerías disponibles para ambas pantallas (panel frontal Figura 2.2 y diagrama de bloques Figura 2.3) que permiten la creación de objetos mediante su selección en dichas paletas y librerías (Figuras 2.4 y 2.5).

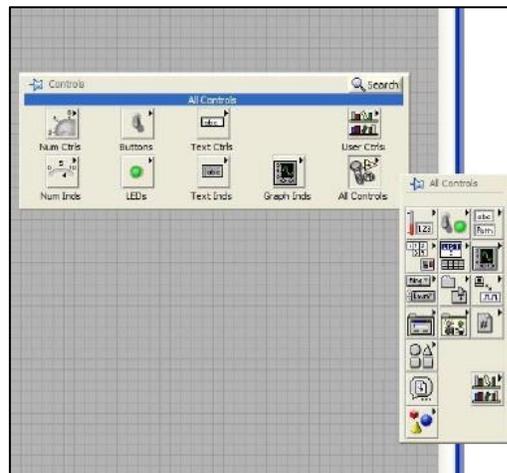


Figura 2.4. Librerías Panel frontal

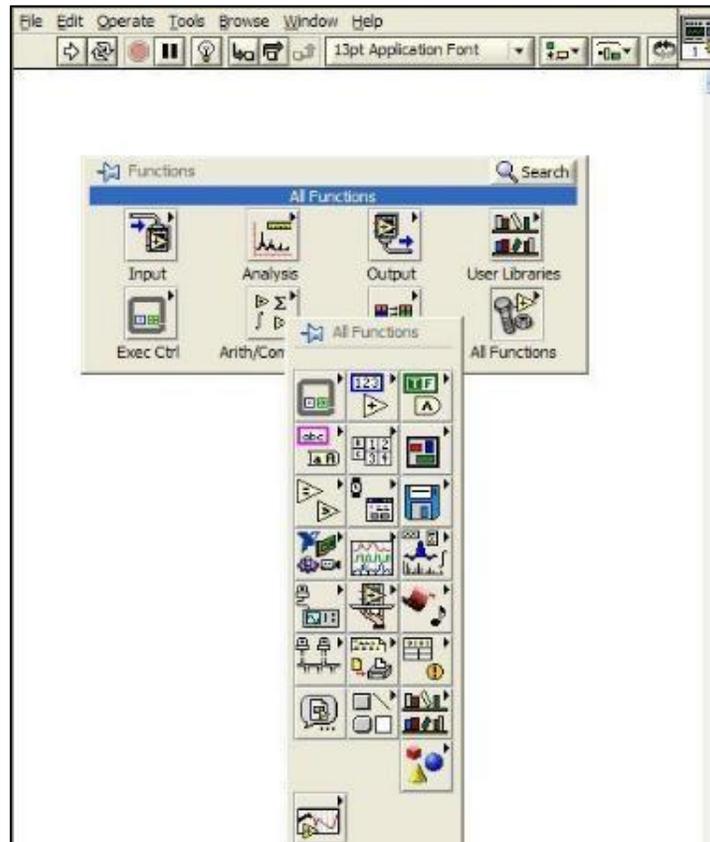


Figura 2.5. Librerías Panel Block Diagram

2.5 Arduino

Arduino es una placa electrónica que contiene un microcontrolador y su objetivo se basa en pequeños proyectos, para aficionados y amantes de la electrónica en general. Su principal característica es la facilidad con la que se programa, a diferencia de las demás placas con microcontroladores del mercado que su programación es más laboriosa, además Arduino es una empresa basada en software y hardware libre con la ventaja que se puede utilizar en cualquier ambiente y proyecto.

Las placas de Arduino se pueden utilizar de diferentes maneras, ya sean alimentadas a través de USB por medio del ordenador o con una pequeña batería sin necesidad de conectarse con el ordenador. Arduino se programa a través de un programa gratis que se

descarga a través de la página web de Arduino, y a través de este se transfiere el programa que se escriba desde el ordenador a la placa, estos programas utilizan un lenguaje de programación propio de Arduino basado en Wiring. Pero también se puede utilizar Arduino con otros programas, como, por ejemplo, simulink de Matlab (tiene librería para utilizar Arduino), pero siempre cargando un programa a la placa que interacciona correctamente con simulink, suelen ser programas básicos que vienen con la librería de Matlab, o con la librería del programa que quieres utilizar.

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada de toda una gama de sensores y puede interactuar con aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores. Arduino dispone de diferentes placas dependiendo de la necesidad que tenga el proyecto [11].

2.5.1 Arduino uno

Arduino uno (Figura 2.6) es una placa que contiene 14 pines de entradas/salidas digitales (de las cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM), 6 pines de entradas analógicas, un botón de reset, una conexión para USB, una conexión para alimentar el Arduino de forma externa, todo ello basado en el microcontrolador ATmega328. A continuación se muestran en la Tabla 2.2, los principales componentes de Arduino Uno [11].



Figura 2.6. Placa Arduino Uno

Tabla 2.2. Característica de Arduino Uno.

Principales características de Arduino Uno	
Microcontrolador	ATmega328
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límite inferior/superior)	6-20V
Pines digitales Entrada/Salida	14 (6 proporcionan salida PWM)
Pines entrada analógica	6
Corriente para pines de entrada/salida	40 mA
Corriente para Pin 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328) 0.5 KB para arranque
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidad de reloj	16 MHz

2.5.2 Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 (Figura 2.7) es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560. Tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 15 pueden ser usadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs, un cristal de 16Mhz, conexión USB, jack para alimentación DC, conector ICSP, y un botón de reseteo. La placa Mega 2560 es compatible con la mayoría de shields compatibles para Arduino UNO [11].



Figura 2.7. Placa Arduino Mega 2560

2.6. Técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable

Para obtener los parámetros necesarios para el análisis de esfuerzos y para determinar constantes elásticas y térmicas, son necesarios los métodos experimentales, modelos matemáticos y métodos computacionales.

2.6.1. Técnicas para análisis experimentales

Para llevar a cabo el análisis experimental de esfuerzos existen muchas técnicas experimentales, dentro de éstas se pueden mencionar las siguientes [12]:

- a) Fotoelasticidad (ver Figura 2.8), basada en el principio de birefringencia temporal derivada de los patrones de franja generados en componentes fotoelásticos mediante luz polarizada, es de campo completo, es un método directo y es portátil. Desventajas: requiere una fuente de luz, sólo opera entre un rango de temperatura de 0 a 60°C.
- b) Extensometría Eléctrica de Resistencia Variable (Strain Gages), (ver Figura 2.9), es una técnica punto a punto derivada de los cambios en la resistencia de un material conductor que es estirado. Ventajas: es una tecnología madura, de bajo costo, disponible comercialmente, muy precisa (debajo de $0.1 \mu\epsilon$), de pequeña masa y volumen, se puede monitorear a control remoto, puede medir a tensión y compresión, reutilizable, buena respuesta de frecuencia, fácil de pegar, se puede usar para amplia gama de materiales. Desventajas, no es de campo completo, requiere habilidades para instalar y para interpretar resultados, las deformaciones medidas son promedio, se requieren tres mediciones para el estado completo de esfuerzos, la elongación está limitada al 20% aproximado. Se aplica en análisis de esfuerzos de componentes de ingeniería y estructura, es un elemento sensor para muchos tipos de transductores.



a) Polariscopio de transmisión

b) Polariscopio de reflexión

Figura 2.8. Equipo utilizado para la técnica de fotoelasticidad



a) Extensómetro eléctrico

b) Probador de extensómetros

c) Puente de Wheatstone P3-Strain

Figura 2.9. Técnica de Extensometría Eléctrica de Resistencia Variable

2.6.2. Técnicas experimentales para medir deformaciones térmicas

Para el análisis de esfuerzos térmicos en los materiales, es necesario medir las deformaciones que se generan como consecuencia de la expansión térmica del material, estas mediciones se hacen en la superficie. Algunas técnicas utilizadas para hacer mediciones son:

- 1) La técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable (TEERV).
- 2) Interferometría patrón de manchas.
- 3) TSA y Termografía Infrarroja.
- 4) La Dilatometría.
- 5) La Microscopía Raman.

2.6.3 Usos de la técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable

La técnica experimental de extensometría eléctrica de resistencia variable (strain gage), es utilizada para medir deformaciones en los compuestos sometidos a cargas mecánicas, térmicas o cargas combinadas térmicas-mecánicas, que se utilizan para determinar los esfuerzos térmicos. Las mediciones son llevadas a cabo mediante los extensómetros eléctricos de resistencia variable, como los mostrados en la Figura 2.10.

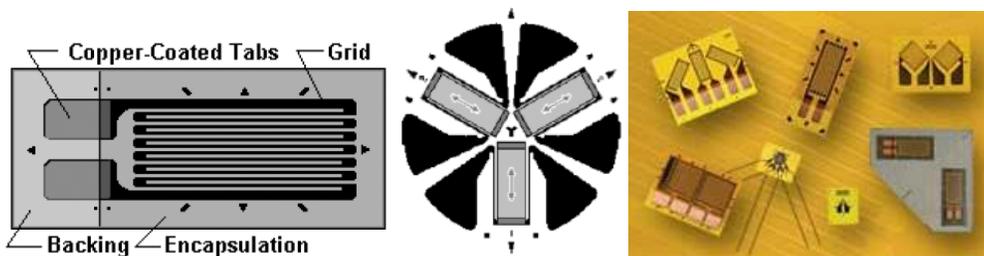


Figura 2.10. Extensómetros eléctricos usados en mediciones de deformación.

Un extensómetro eléctrico de resistencia variable es un transductor que convierte una deformación mecánica en una correspondiente señal eléctrica.

El extensómetro es un sensor que mide deformaciones promedio puntuales donde se instrumenta, por lo que la información que puede obtenerse de ellos es real y pertenece únicamente al punto instrumentado [13]. Con la información proporcionada por los extensómetros, sólo es posible determinar, los valores de deformaciones o de esfuerzos en otros puntos de un elemento, cuando se cuenta con un modelo matemático en el que se considera que la distribución de esfuerzos es homogénea y es lineal. No es posible conocer las deformaciones en otros puntos del elemento analizado cuando no se cumple con todas las condiciones anteriormente mencionadas.

Las galgas extensométricas como se explica en [12, 13], son preferidas para medir las deformaciones que son utilizadas para determinar las constantes elásticas, los coeficientes de expansión térmica, los esfuerzos mecánicos y los esfuerzos térmicos, pues las otras técnicas que son usadas, son más complejas y de mayor costo.

2.7. Coeficientes de expansión térmica (CET)

Para determinar los coeficientes de expansión/contracción térmica en materiales se usan procesos como los mostrados a continuación.

2.7.1. CET en materiales metálicos

Si se usa la técnica TEERV (strain gage), Estos coeficientes en materiales metálicos simples, se determinan mediante el método propuesto por Vishay en [14], el cual consiste en:

1. Seleccionar un material metálico conocido que se le llama material de referencia.
2. Seleccionar el material del que se necesita conocer su CET, que es llamado material de prueba.
3. Instrumentar con galgas extensométricas ambos materiales.
4. Colocar tanto el material de prueba como el material de referencia en la misma cámara y someterlos a cambios de temperatura y medir las deformaciones.
5. Determinar usando la Ecuación 2.1, a partir del CET del material de referencia, el CET del material de prueba.

$$\alpha_S = \alpha_R + \frac{\varepsilon_{T/O(G/S)} - \varepsilon_{T/O(G/R)}}{\Delta T} \quad (2.1)$$

Aquí, α_S es llamada CET del material de prueba, α_R es el CET del material de referencia, $\varepsilon_{T/O(G/S)}$ y $\varepsilon_{T/O(G/R)}$ son las deformaciones térmicas medidas en los materiales de prueba y referencia, respectivamente, ΔT es cambio de temperatura.

2.7.2. CET en materiales compuestos metálicos simétricos

Si los CET, se determinan en materiales compuestos laminados metálicos, se utilizan las ecuaciones desarrolladas [12] y utilizadas en [15, 16], para obtener CET en un compuesto laminado metálico simétrico AL-AI-AL y AI-AL-AI, los materiales usados para fabricar estos compuestos son aluminio (AL) y acero inoxidable (AI). Las Ecuaciones 2.2 y 2.3 son una propuesta para la obtención de los CET del aluminio y del acero inoxidable.

$$\alpha_{AL} = \frac{1}{\frac{E_{AL}}{1-\nu_{AL}} \left(\frac{\eta_{ALC1}}{\eta_{AIc1}} - \frac{\eta_{ALC2}}{\eta_{AIc2}} \right)} \left\{ \left(\frac{\eta_{ALC1}}{\eta_{AIc1}} \frac{A}{\Delta T_{C1}} \right) - \left(\frac{\eta_{ALC2}}{\eta_{AIc2}} \frac{C}{\Delta T_{C2}} \right) + \frac{B}{\Delta T_{C1}} - \frac{D}{\Delta T_{C2}} \right\} \quad (2.2)$$

$$\alpha_{AI} = \frac{1}{\frac{E_{AI}}{1-\nu_{AI}} \left(\frac{\eta_{AIc2}}{\eta_{ALC2}} - \frac{\eta_{AIc1}}{\eta_{ALC1}} \right)} \left\{ \frac{D}{\Delta T_{C2}} \left(\frac{\eta_{AIc2}}{\eta_{ALC2}} \right) - \frac{B}{\Delta T_{C1}} \left(\frac{\eta_{AIc1}}{\eta_{ALC1}} \right) + \frac{C}{\Delta T_{C2}} - \frac{A}{\Delta T_{C1}} \right\} \quad (2.3)$$

Los módulos A, B, C, y D, son determinados de la Ecuaciones 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7:

$$A = \frac{E_{AL}}{1-\nu_{AL}^2} (\varepsilon_{xc1}^0 + \nu_{AL} \varepsilon_{yc1}^0) \quad (2.4)$$

$$B = \frac{E_{AI}}{1-\nu_{AI}^2} (\varepsilon_{xc1}^0 + \nu_{AI} \varepsilon_{yc1}^0) \quad (2.5)$$

$$C = \frac{E_{AL}}{1-\nu_{AL}^2} (\varepsilon_{xc2}^0 + \nu_{AL} \varepsilon_{yc2}^0) \quad (2.6)$$

$$D = \frac{E_{AI}}{1-\nu_{AI}^2} (\varepsilon_{xc2}^0 + \nu_{AI} \varepsilon_{yc2}^0) \quad (2.7)$$

Donde: Aquí, α_{AL} es el coeficiente de expansión/contracción térmica del aluminio, α_{AI} es el CET del acero inoxidable, ε_{xc1}^0 y ε_{yc1}^0 , son las deformaciones longitudinal y transversal medidas en la frontera del compuesto C1; ε_{xc2}^0 y ε_{yc2}^0 son las deformaciones longitudinal y

transversal medidas en la frontera del compuesto C2; E_{AL} y E_{AI} son los módulos de elasticidad; ν_{AL} y ν_{AI} las relaciones de Poisson de las capas, α_{AL} y α_{AI} los CET de las capas de aluminio y acero inoxidable de cada compuesto; ΔT_{c1} es el cambio de temperatura.

Capítulo III

DESARROLLO

En este capítulo, se presenta el procedimiento del desarrollo de la instrumentación, interfaz usuario-máquina y control de un sistema de refrigeración didáctico para pruebas en materiales aeronáuticos. Este sistema, en conjunto con el equipo de extensometría eléctrica, provee información de las micro deformaciones del material a analizar sometido a temperaturas menores a la temperatura ambiente. También muestra gráficamente el comportamiento térmico de los diferentes componentes que integran el sistema para el aprendizaje de los alumnos. En este proyecto se integran diferentes herramientas tecnológicas que facilitan el diseño de la interfaz y control del sistema como son LabView y Arduino, una vez instrumentados los sensores y actuadores necesarios dentro del sistema, el primero aporta el entorno visual y control del sistema, mientras que el segundo facilita la actuación de los diferentes dispositivos electrónicos mediante la comunicación entre ambos.

Dentro de este capítulo también se muestran los resultados de la propuesta de solución para el problema planteado, es decir el funcionamiento final del equipo de refrigeración didáctico al efectuar pruebas a diferentes materiales, esto con el fin de resolver los objetivos establecidos.

3.1 Instrumentación de componentes electrónicos del sistema

3.1.1 Sensores

Uno de los componentes electrónicos más importantes dentro del sistema de refrigeración didáctico son los sensores de temperatura, ya que estos aportan la información necesaria para el monitoreo y control del sistema. Para desempeñar esta parte del proceso se seleccionaron los sensores: LM35 y DS18B20.

El primero cuenta con una precisión calibrada de 1°C , su rango de medición abarca desde -55°C (con ciertos ajustes al armar el circuito, además de presentar fallos ocasionales al trabajar por mucho tiempo en ambientes fríos) hasta 150°C . La salida es lineal y cada grado centígrado equivale a 10 mV , es ideal para aplicaciones remotas ya que consume menos de 60 mA de corriente y es compatible con Arduino o cualquier microcontrolador, como se indica en su Datasheet [17]. Por lo anteriormente dicho y por su bajo costo fue seleccionado para medir las temperaturas externas del sistema de refrigeración (Figura 3.1).

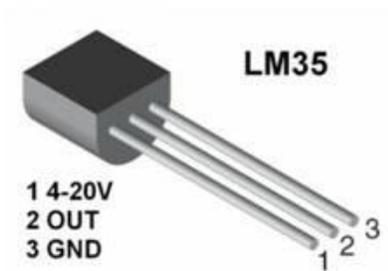


Figura. 3.1. Sensor LM35

El segundo es un sensor digital de temperatura que utiliza el protocolo 1-Wire para comunicarse, este protocolo necesita solo un pin de datos para comunicarse y permite conectar más de un sensor en el mismo bus. El sensor DS18B20 es fabricado por Maxim

Integrated, el encapsulado de fábrica es tipo TO-92 similar al empleado en transistores pequeños. La presentación comercial más utilizada por conveniencia y robustez es la del sensor dentro de un tubo de acero inoxidable resistente al agua y temperaturas por debajo del ambiente (Figura 3.2).



Figura. 3.2. Sensor DS18B20

Con este sensor se puede medir temperatura desde los -55°C hasta los 125°C y con una resolución programable desde 9 bits hasta 12 bits. Cada sensor tiene una dirección única de 64 bits establecida de fábrica, esta dirección sirve para identificar al dispositivo con el que se está comunicando, puesto que en un bus 1-wire pueden existir más de un dispositivo. El sensor tiene dos métodos de alimentación: alimentación a través del pin de datos y alimentación usando una fuente externa.

Para poder trabajar el DS18B20 en Arduino necesitamos dos librerías:

- Librería OneWire. En esta librería está implementado todo el protocolo del bus 1-wire y puede usarse tanto para el DS18B20 como para otros dispositivos 1-wire (la librería fue descargada de <https://github.com/PaulStoffregen/OneWire>).

- Librería DallasTemperature. En esta librería están implementadas las funciones necesarias para poder realizar las lecturas o configuraciones del sensor (esta librería fue descargada de <https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library>.)

Debido a la ya mencionada robustez del sensor al trabajar con efectividad en ambientes fríos y su fácil acoplamiento con Arduino mediante librerías se eligió este sensor para trabajar con las temperaturas internas del sistema de refrigeración (temperaturas menores al ambiente).

Estos sensores fueron colocados en partes clave del equipo didáctico para medir el sobrecalentamiento y el subenfriamiento del sistema, así como la temperatura interna de la cámara y la temperatura ambiente como se indica en la Figura 3.3 y en la Tabla 3.1.

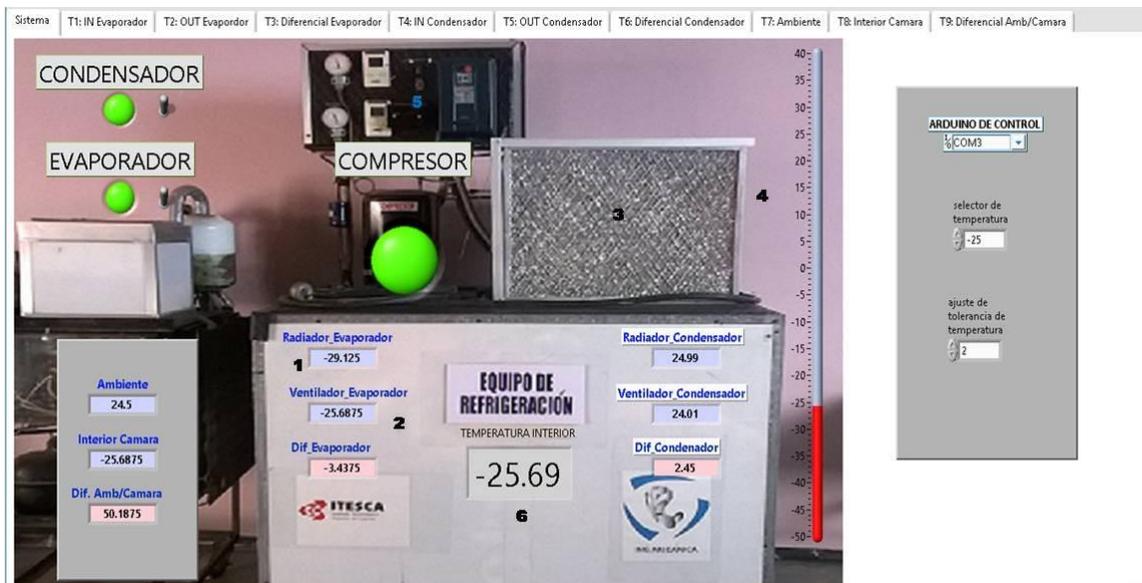


Figura. 3.3. Ubicación de Sensores dentro del módulo de refrigeración

Tabla 3.1. Ubicación y función de sensores en el sistema de refrigeración

No. y tipo de sensor	Ubicación del sensor	Función del sensor
1 DS18B20	Entrada del evaporador	Subenfriamiento
2 DS18B20	Salida del evaporador	
3 LM35	Entrada del condensador	Sobrecalentamiento
4 LM35	Salida del condensador	
5 LM35	Temperatura ambiente	Comparación con cámara interior
6 DS18B20	Temperatura interior de la cámara	Control y monitoreo del sistema

3.1.2 Actuadores

Como se mencionó anteriormente el encendido y apagado del equipo eran totalmente manuales, sin embargo, para cumplir con el objetivo de implementar por completo una interfaz usuario-maquina se optó por incluir esta opción dentro del sistema de refrigeración, permitiendo al usuario encender y apagar el equipo desde su computadora.

Para lograr el objetivo ya mencionado, se instrumentó un módulo Arduino de relevadores (Figura 3.4), el cual controla el encendido y apagado de los componentes principales del sistema (compresor y abanicos) mediante el programa de control. Sin embargo, como los relés controlan corrientes de bajo valor, fue necesario instrumentar también un contactor (ver Figura 3.5), para conexiones de elevada tensión y potencia (220 v), el cual se utilizó como interruptor electromagnético en la conexión y desconexión del compresor y abanicos accionado por la señal del módulo Arduino. La función complementaria de estos circuitos eléctricos (contactor y relevador) es conocida comúnmente como “circuitos de esclavización y de señalización”.



Figura 3.4. Módulo relé Arduino 4 canales 5v



Figura 3.5. Contactor magnético 2 polos 220v

3.1.3 Diagrama de conexión

Finalmente, los sensores y actuadores seleccionados fueron colocados donde se explicó anteriormente y conectados a las placas Arduino MEGA y Arduino UNO como se muestra en el diagrama de conexión de la Figura 3.6.

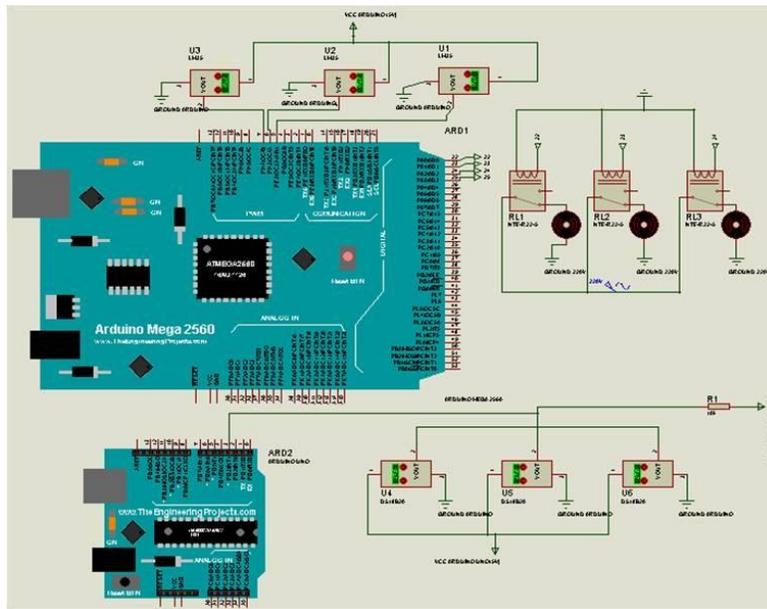


Figura 3.6. Diagrama de conexión

3.2 Desarrollo del Sistema de Refrigeración Didáctico

Para el control del sistema se utilizaron 2 placas Arduino, específicamente: la placa Arduino Mega y la placa Arduino Uno. La primera se utilizó únicamente para el control del sistema mediante el módulo relé y la obtención de datos adquiridos por los sensores LM35. Para controlar esta tarjeta mediante LabVIEW se procedió a utilizar las librerías de comunicación de este programa, las cuales se pueden observar en la Figura 3.7.

Una vez descargadas las librerías se procedió a cargar en Arduino un programa el cual se llama Lifa Base (ve Figura 3.8). Para que LabVIEW pueda comunicarse con Arduino se envía a la memoria de Arduino el programa. Este se instala por defecto, en el proceso de descarga del TOOLKIT Arduino. Luego que se transfiere el programa, este se encarga de comunicarse con Arduino.

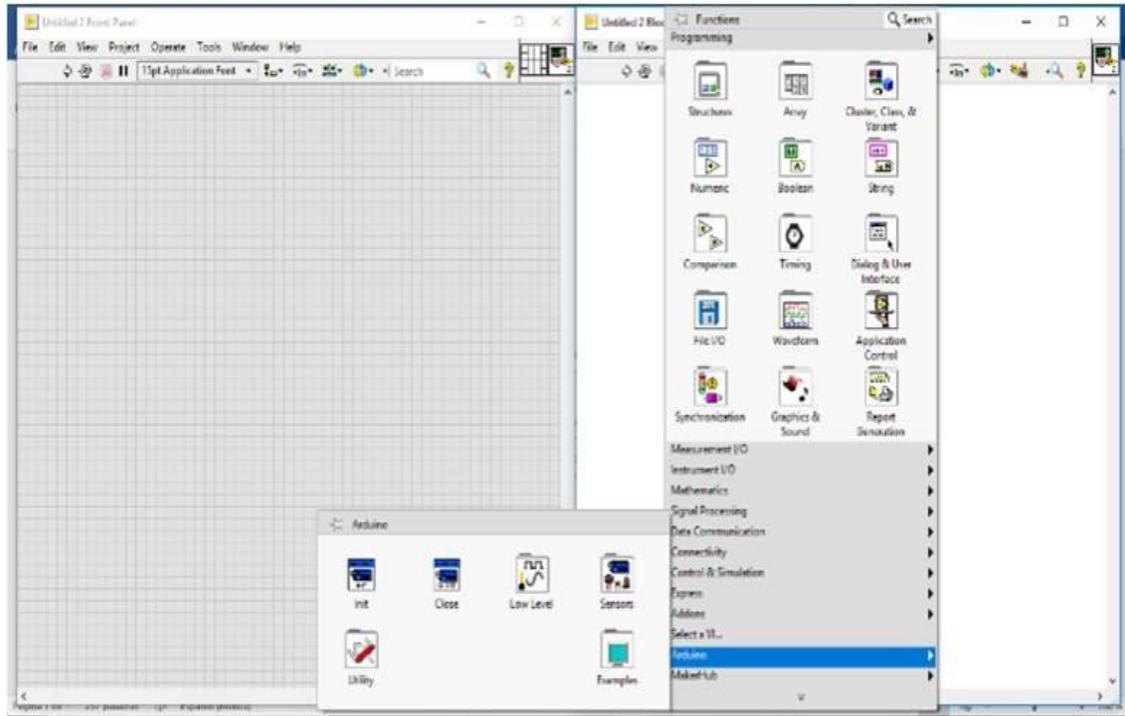


Figura 3.7. Librerías de LabVIEW para control de Arduino

```

LIFA_Base Arduino 1.6.12
Archivo  Editor  Programa  Herramientas  Ayuda

LIFA_Base  AFMotor.cpp  AFMotor.h  AccelStepper.cpp  AccelStepper.h  iRremote.cpp  iRremote.h  iRremoteInt.h  LabVIEWInterface.h  LabVIEWWin...ice

.....
**
**  LIFA_Firmware - Provides Basic Arduino Sketch For Interfacing With LabVIEW.
**
**  Written By:   Sam Kristoff - National Instruments
**  Written On:   November 2010
**  Last Updated: Dec 2011 - Kevin Fort - National Instruments
**
**  This File May Be Modified And Re-Distributed Freely. Original File Content
**  Written By Sam Kristoff And Available At www.ni.com/arduino.
**
.....
/.....
**

```

Figura 3.8. Programa Lifa Base en Arduino

Como se mencionó anteriormente se utilizó también la placa Arduino Uno, a esta placa se conectaron los sensores DS18B20, los cuales proporcionan la lectura de las temperaturas bajo cero del sistema. Para poder comunicar esta tarjeta con LabVIEW se utilizó la herramienta de comunicación serial de LabVIEW (ver Figura 3.9), esto debido a que estos sensores son controlados por el programa Arduino mediante la librería DallasTemperature, eliminando así la opción de usar Lifa Base como se utilizó en el Arduino Mega.

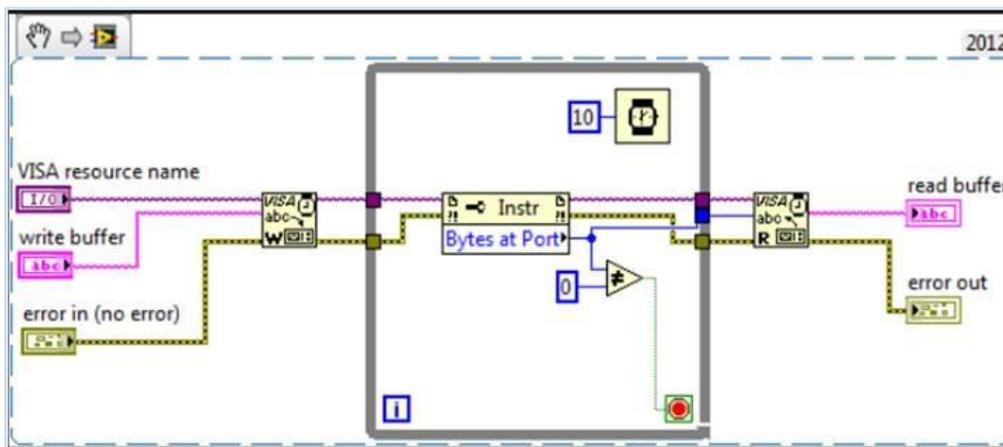


Figura 3.9 Ejemplo de comunicación serial de LabVIEW-Arduino

De esta manera Arduino Uno, usa un programa el cual obtiene datos recopilados por los sensores DS18B20, enviando estos mismos mediante comunicación serial a LabVIEW (el programa utilizado se puede observar en la Figura 3.10). Posteriormente LabVIEW adquiere, despliega y guarda estos datos en variables globales (ver Figura 3.11), que serán utilizadas y sobrescritas dentro del programa de interfaz usuario-maquina, cabe mencionar que estos datos son específicamente tres: temperatura interior de la cámara de refrigeración, temperatura de entrada del evaporador (Evaporador-Radiador) y temperatura de salida del evaporador (Evaporador-Ventilador).

```

ds18b20x3 Arduino 1.6.12
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

ds18b20x3

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 2
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  sensors.begin();
}

void loop(void) {
  sensors.requestTemperatures();
  String sensor1 = String(sensors.getTempCByIndex(0), DEC);
  String sensor2 = String(sensors.getTempCByIndex(1), DEC);
  String sensor3 = String(sensors.getTempCByIndex(2), DEC);
  String temp1 = String("A" + sensor1);
  String temp2 = String("B" + sensor2);
  String temp3 = String("C" + sensor3);

  Serial.println(temp1);
  Serial.println(temp2);
  Serial.println(temp3);
}

```

Figura 3.10. Programa Cargado en Arduino Uno

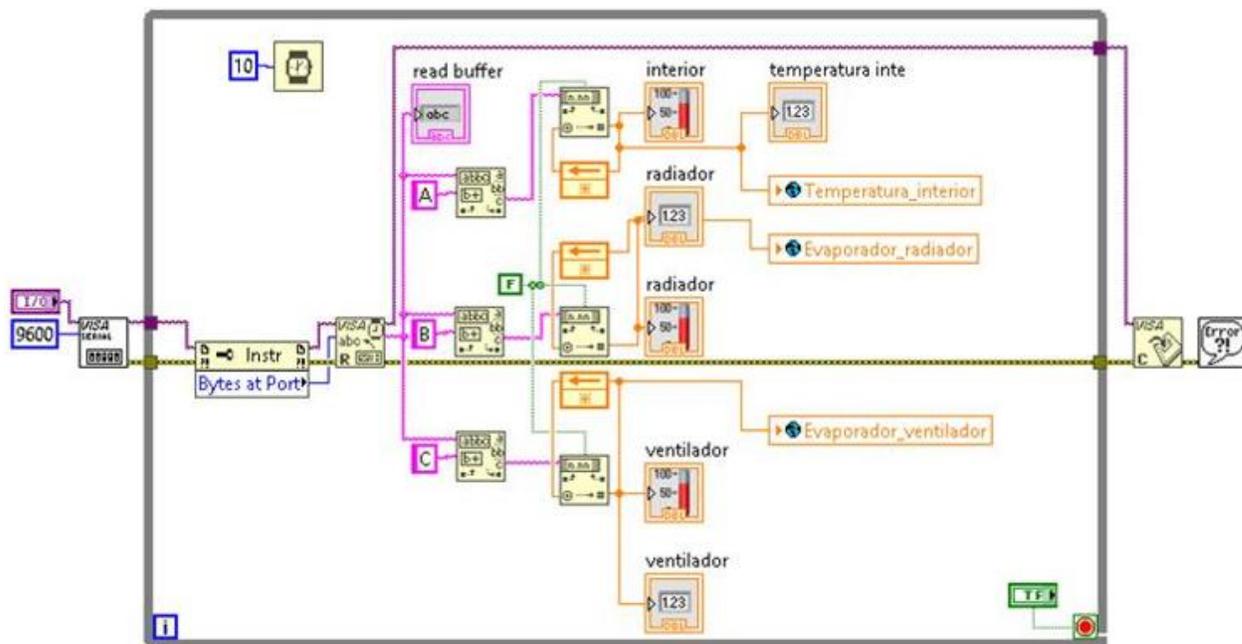


Figura 3.11. Programación en LabView para la adquisición de datos DS18B20

3.2.1 Programa de control del sistema de refrigeración didáctico

En este programa se integran los diferentes elementos ya mencionados, para: controlar el encendido y el apagado de los componentes principales del sistema (evaporador, condensador y compresor); controlar la temperatura del equipo y desplegar los gráficos correspondientes a las temperaturas internas, externas, sub-enfriamiento y sobrecalentamiento del sistema. Dicha programación puede observarse en la Figura 3.12 (se observa un acercamiento en las Figuras 3.13, 3.14 y 3.15).

En la Figura 3.12, se puede observar la comunicación mediante librerías de LabVIEW con Arduino MEGA y la declaración de pines de salida (22, 23, y 25) que son los correspondientes al módulo de relevadores de Arduino (Figura 3.13). También se puede observar que el programa lee las variables globales sobrescritas por el programa de instrumentación para los sensores DS18B20 (ver Figuras 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14). Este programa despliega en la interfaz usuario-maquina los valores de las temperaturas obtenidas por los sensores (Figura 3.17, esta parte se verá detalladamente en la sección de resultados). También se puede observar (ver Figuras 3.12 y 3.15), que en base a los datos que obtiene, el programa toma decisiones de cuando apagar o encender los componentes del sistema (compresor, evaporador, condensador).

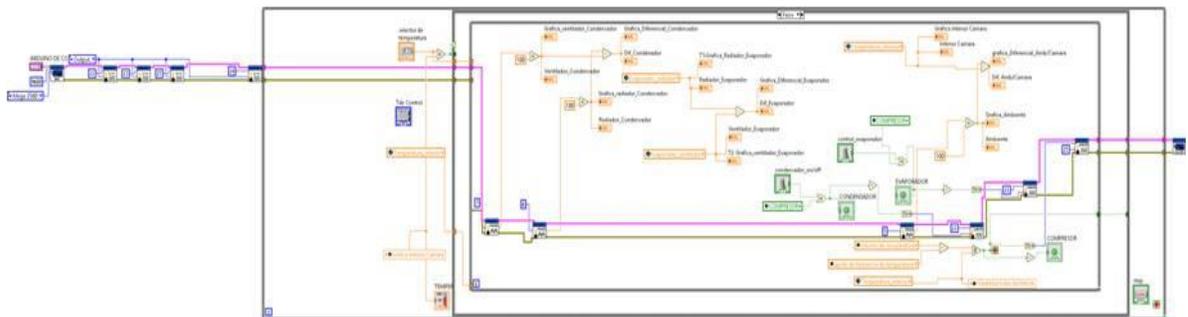


Figura 3.12. Programa de control del Sistema de Refrigeración Didáctico

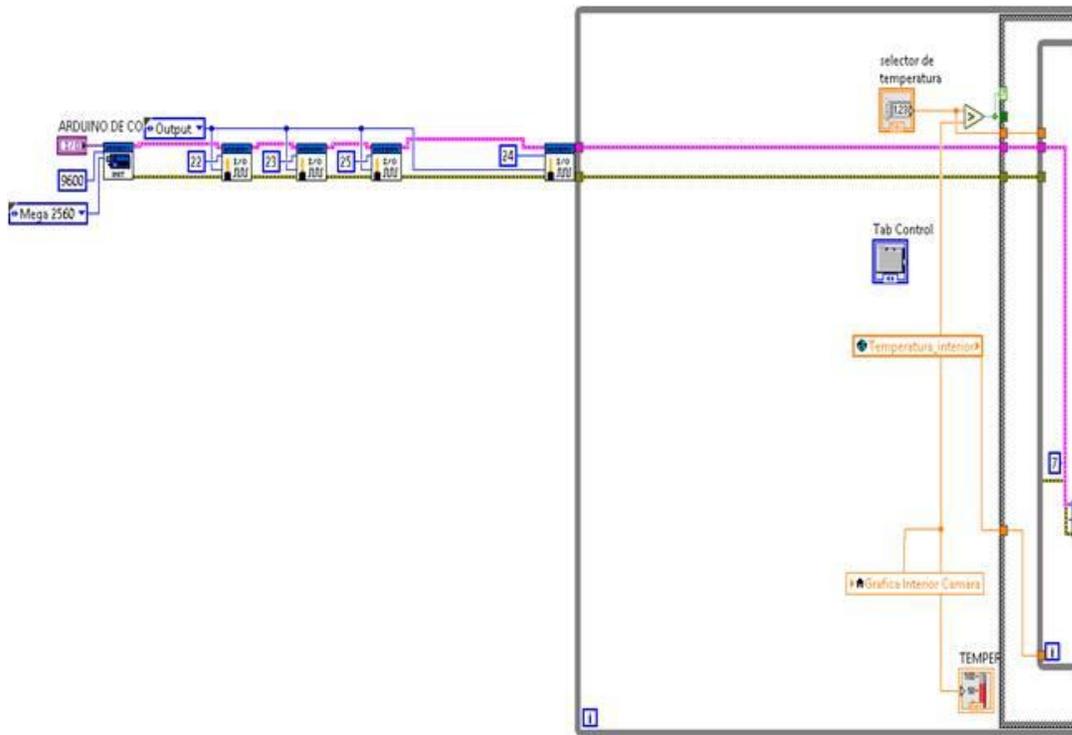


Figura 3.13. Programa de control parte 1

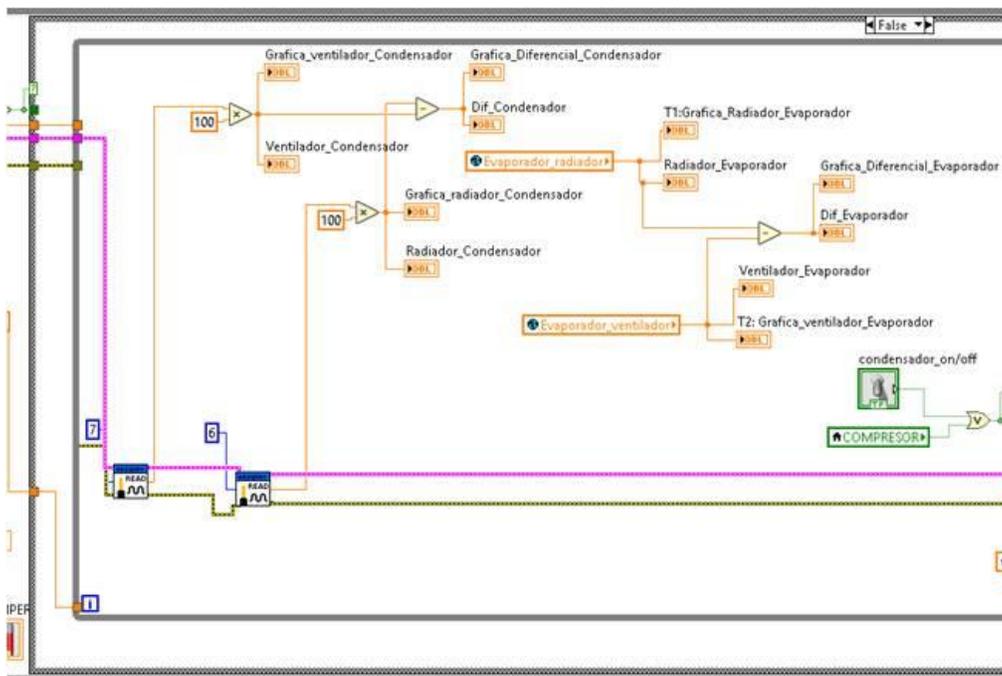


Figura 3.14. Programa de control parte 2

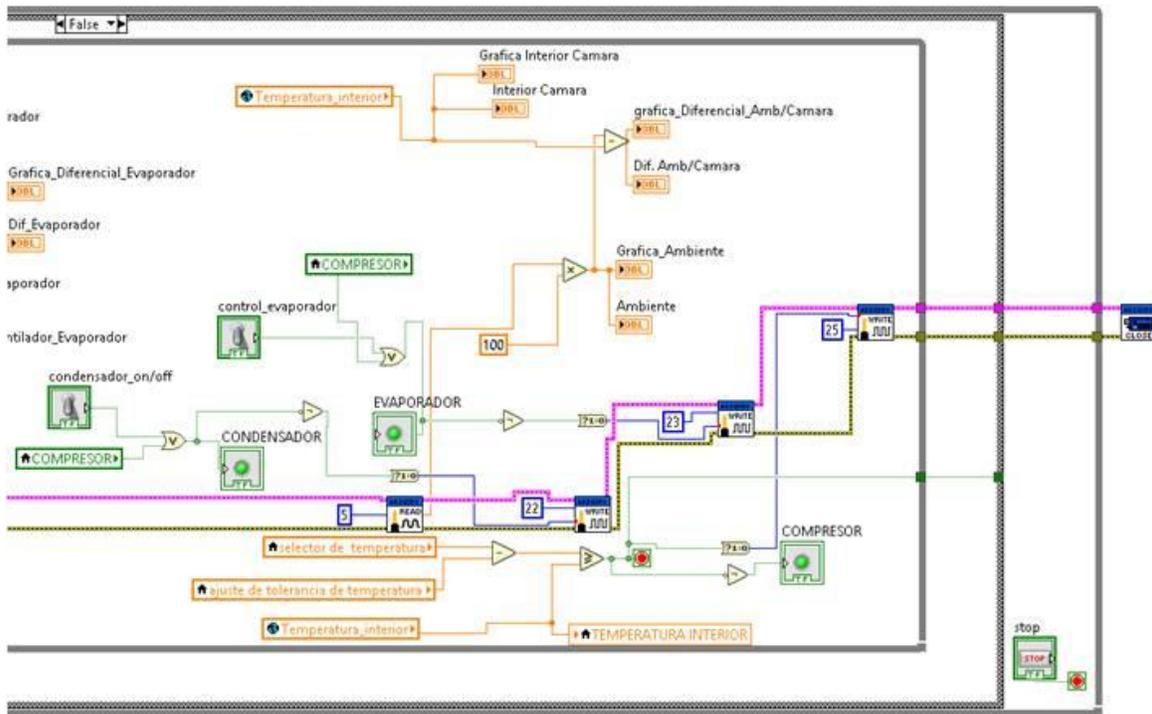


Figura 3.15. Programa de control parte 3

Como se observa en la Figura 3.12 el programa está elaborado en una estructura tipo “case” o caso en español, esta estructura tiene dos subrutinas una llamada “true” y otra “false”. Esta estructura cambia el caso dependiendo de la temperatura dentro de la cámara y la temperatura deseada. Si la temperatura dentro de la cámara es mayor que la deseada, la estructura “case” entra en la subrutina “false” la cual manda a encender el compresor para disminuir la temperatura en el interior de la cámara. Cuando la temperatura dentro de la cámara es menor que la deseada, la estructura “case” entra en la subrutina “true” en la cual el compresor es desactivado.

A continuación, se muestran la sección “true” de la subrutina case (Figura 3.16), ya que no se muestra en la Figura 3.12 debido a que es una subrutina “escondida” en el programa.

Cabe mencionar que entre las subrutinas “true” y “false” no existe diferencia alguna a excepción de la mencionada con anterioridad.

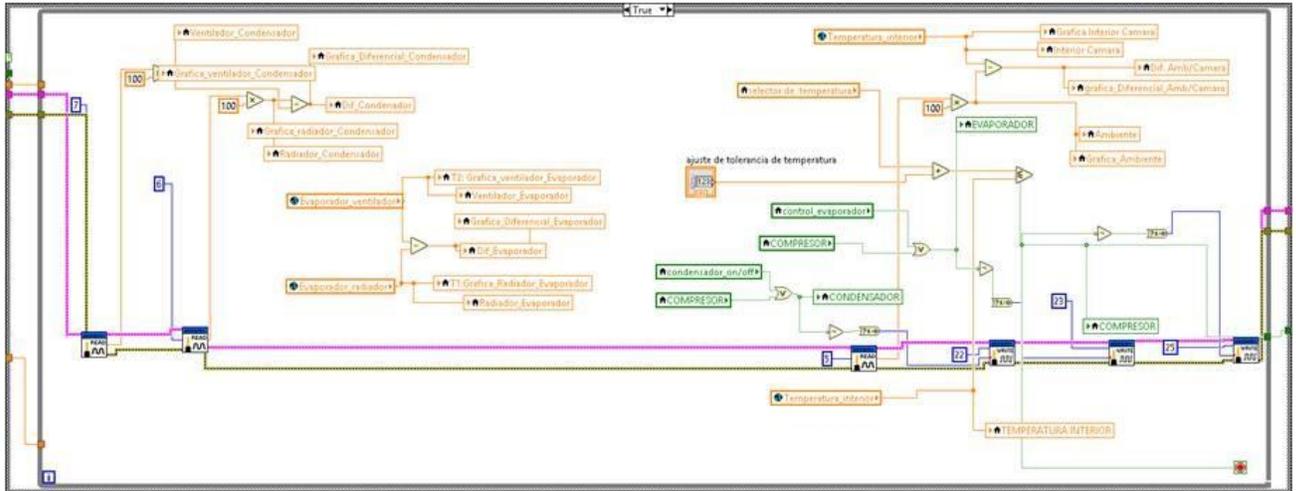


Figura 3.16. Subrutina “True” de la estructura “case”

3.3 Pruebas experimentales térmicas para determinar coeficientes de expansión térmica

Para determinar los coeficientes de expansión térmica (CET), es necesario conocer las temperaturas, las deformaciones medidas en las fronteras, y el conocimiento del CET de un material plenamente identificado. Para conocer experimentalmente estas deformaciones, una de las formas es, instrumentar las fronteras mediante la técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable, los materiales de los cuales se pretende conocer los CET, y sometidos a diferentes temperaturas de trabajo.

Las pruebas experimentales para conocer las deformaciones y determinar los CET, se llevan a cabo sin limitar las fronteras del material y sometidos a cambios de temperatura en:

- a) Un horno de temperatura controlada, para temperaturas superiores a la temperatura ambiente.
- b) Un equipo de refrigeración de temperatura controlada, para temperaturas inferiores a la temperatura ambiente.

3.3.1 Equipos y materiales para las pruebas

Como en este trabajo de tesis, uno de los objetivos es, además de instrumentar y programar con el Software LabView, la Máquina de Refrigeración Didáctica (MRD) mostrada en la Figura 3.17, es utilizar esta, para obtener de forma experimental las deformaciones que se presentan en las fronteras de los materiales de prueba, que son consecuencia de la dilatación o contracción generada por los cambios de temperatura. Para llevar a cabo estas pruebas se requieren:

- 1) Una MRD que fue construida como un proyecto de la materia de Refrigeración, por los estudiantes y el profesor y que fue reportada en [18], con la cual se pueden lograr temperaturas hasta de -25.69°C .
- 2) Un Puente de WheatStone, marca VISAY, P3-Strain Recorded (ver Figura 3.18). Para medir deformaciones.
- 3) Dos materiales que, para este fin, son llamados de referencia (ver Figura 3.19): a) una probeta de acero inoxidable 304, de 25.96 mm de ancho, por 2.95 mm de espesor; b) una de aluminio aeronáutico AL 2024-T3, de 30.95 mm de ancho por 0.635 mm de espesor.
- 4) Cuatro probetas consideradas como materiales de prueba (ver Figura 3.19), los cuales son: a) una probeta de aluminio de aleación desconocida de 25.4 mm de

ancho y 12 mm de espesor, instrumentado en las direcciones x,y,z; b) una probeta de un compuesto laminado de cinco capas de Fibra de Carbono instrumentada en dos direcciones: a) longitudinal (x), y b) transversal (y); y c) una probeta de plástico instrumentada en dirección longitudinal (x).

- 5) Computadora LapTop.
- 6) SoftWare LabView.

Todas las probetas fueron instrumentadas con sensores llamado extensómetros eléctricos de resistencia variable (Strain Gages), de la marca Micro-Measurement tipo EA-06-120LZ-120/E, de propósito general, con un factor de 2.08, cuyo rango de temperatura de trabajo es de -6 a 60°C.



Figura 3.17. Máquina de refrigeración didáctica



Figura 3.18. P3-Strain Recorded

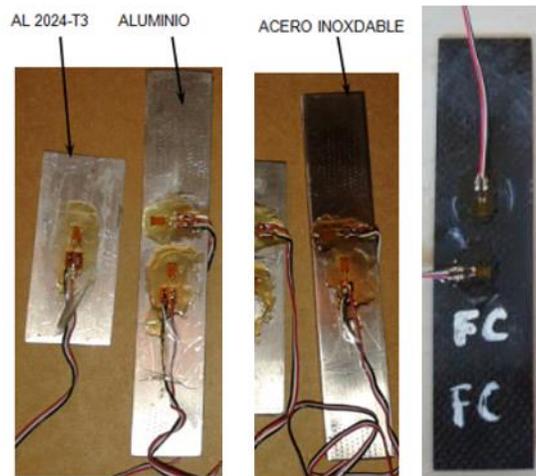


Figura 3.19. Materiales de prueba



Figura 3.20. Canal para conexión

3.3.2 Metodología usada para las pruebas

El proceso para llevar a cabo las pruebas experimentales, que consistió en someter tanto los materiales de referencia como los materiales de prueba, fue el siguiente:

Paso 1. Conectar la MRD a la línea de 220 Volts.

Paso 2. Conectar la computadora al puerto de entrada mediante cable USB.

Paso 3. Programar la MRD desde la temperatura ambiente hasta -5°C .

Paso 4. Instalar los materiales en el interior de la cámara fría de la MRD, sin restringirlos en las fronteras.

Paso 5. Conectar los cables de cada sensor strain gages, a cada canal del puente P3 Strain (ver Figura 3.20), de la siguiente forma: Rojo al P+, Negro a S-, y Blanco a D100.

Paso 6. Encender la MRD.

Paso 7. Calibrar a cero los canales del P3 Strain Recorded, mediante el botón de balance.

Paso 8. Tomar lecturas de deformaciones en el P3 Strain, cada dos grados descendentes hasta llegar a -6°C .

Paso 9. Parar la MRD.

Paso 10. Desconectar los sensores del puente de Wheatstone.

Paso 11. Desinstalar las probetas de la MRD.

Paso 12. Desconectar.

3.3.3 Datos obtenidos de las pruebas experimentales

Se llevaron a cabo dos pruebas experimentales utilizando el proceso mencionado en 3.3.2, las cuales fueron:

Prueba 1. En esta prueba se utilizaron: a) una probeta de acero inoxidable 304, conocido como material de referencia, instrumentada longitudinal y transversalmente y cuyo CET para temperaturas entre 0 y 100°C es 17.3 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$; b) dos materiales de prueba: una probeta de Fibra de Carbono fabricada en ITESCA por un estudiante de Maestría [19], instrumentada en forma longitudinal y transversal; y una probeta de plástico instrumentada en dirección longitudinal.

Los materiales antes mencionados se sometieron a cambios de temperatura controlada en la Máquina de Refrigeración Didáctica (MRD), y mediante el Puente de Wheatstone P3 Strain Recorded, se midieron las deformaciones correspondientes a cada temperatura. Los datos obtenidos se registraron en la Tabla 3.1, y en la Figura 3.21, se muestra la relación deformación-temperatura relativa tanto al material de referencia como a los materiales que fueron utilizados en la prueba.

Tabla 3.1. Datos experimentales obtenidos en la prueba 1

TEMP	ACINOX 304	FIBRA DE CARBONO		PLASTICO
T ° C	ϵ_{XP} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{FCLP} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{FCTP} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{PLP} ($\mu\epsilon$)
10	18	75	77.00	168
8	30	108	115.00	234
6	45	134	147.00	294
5	52	149	170.00	326
3	68	181	207.00	385
1	86	210	240.00	448
0	97	227	255.00	480

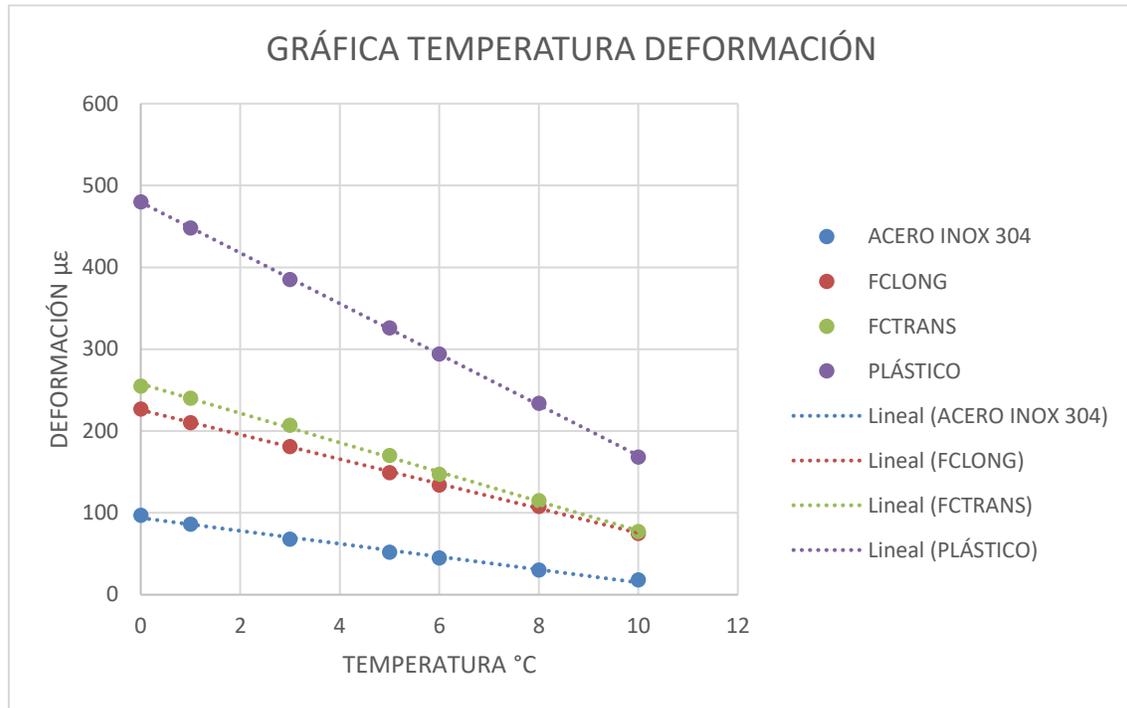


Figura 3.21. Gráfica deformación-temperatura prueba 1

Dónde: FCLONG es Fibra de Carbono Longitudinal; FCTRANS es Fibra de Carbono Transversal

Nota: como se observa la respuesta es prácticamente lineal.

Prueba 2. Los materiales utilizados en esta prueba fueron: a) una probeta de aluminio aeronáutico AL2024-T3, que fue considerado como material de referencia y cuyo CET para temperaturas entre 0 y 100°C es 17.3 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$; b) una probeta de aluminio instrumentada en las tres direcciones de los ejes cartesianos (x, y, z).

En base a [12], se establece que, en materiales isotrópicos, el coeficiente de expansión térmica es similar en cualquiera de las direcciones x, y, z, por lo que, de acuerdo con esto, las deformaciones medidas en las tres direcciones deben ser similares y para el cálculo de CET, se obtendrá una deformación promedio.

Se sometieron estos materiales a prueba en la MRD, siguiendo el protocolo mostrado en el inciso 3.3.2, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Datos experimentales prueba 2, obtenidos en la MRD

TEMP.	AL 2024-T3	MATERIAL DE PRUEBA ALUMINIO			PROMEDIO
°C	Ch 1: ε_{xr} ($\mu\varepsilon$)	Ch 2: ε_{xp} ($\mu\varepsilon$)	Ch 3: ε_{yp} ($\mu\varepsilon$)	Ch 4: ε_{zp} ($\mu\varepsilon$)	ε_{pALP} ($\mu\varepsilon$)
19	51	196	196	197	196.33
18	60	201	201	202	201.33
17.1	68	204	204	205	204.33
16.3	76	207	207	208	207.33
15.4	86	210	210	212	210.67
14.2	97	214	214	216	214.67
13.5	104	217	217	218	217.33
12.7	111	220	220	221	220.33
11.7	123	223	223	224	223.33
10	142	227	227	227	227.00
9.1	153	231	231	232	231.33
8.2	162	233	233	234	233.33
7	176	236	236	238	236.67
6.2	185	239	240	242	240.33

LA PROBETA AL 2024-T3 ES LLAMADO MATERIAL DE REFERENCIA
A LA PROBETA DE ALUMINIO SE LE LLAMA MATERIAL DE PRUEBA

Dónde: ε_{xr} es deformación térmica en dirección x (longitudinal) del material de referencia;
 ε_{xp} , ε_{yp} y ε_{zp} son deformaciones medidas en direcciones x, y, z del material de prueba; y
 ε_{pALP} es la deformación térmica promedio del material de prueba.

Nota: como se observa en la Tabla 3.1, en efecto las deformaciones medidas en las tres direcciones, tienen valores parecidos. Pero también se observa que hay diferencias notables entre las deformaciones medidas en material de referencia y el material de prueba.

En la Figura 3.22, se muestra la relación de la deformación promedio del material de prueba (aluminio) y la deformación del material de referencia (AL2024-T3), con respecto a las temperaturas generadas en la MRD.

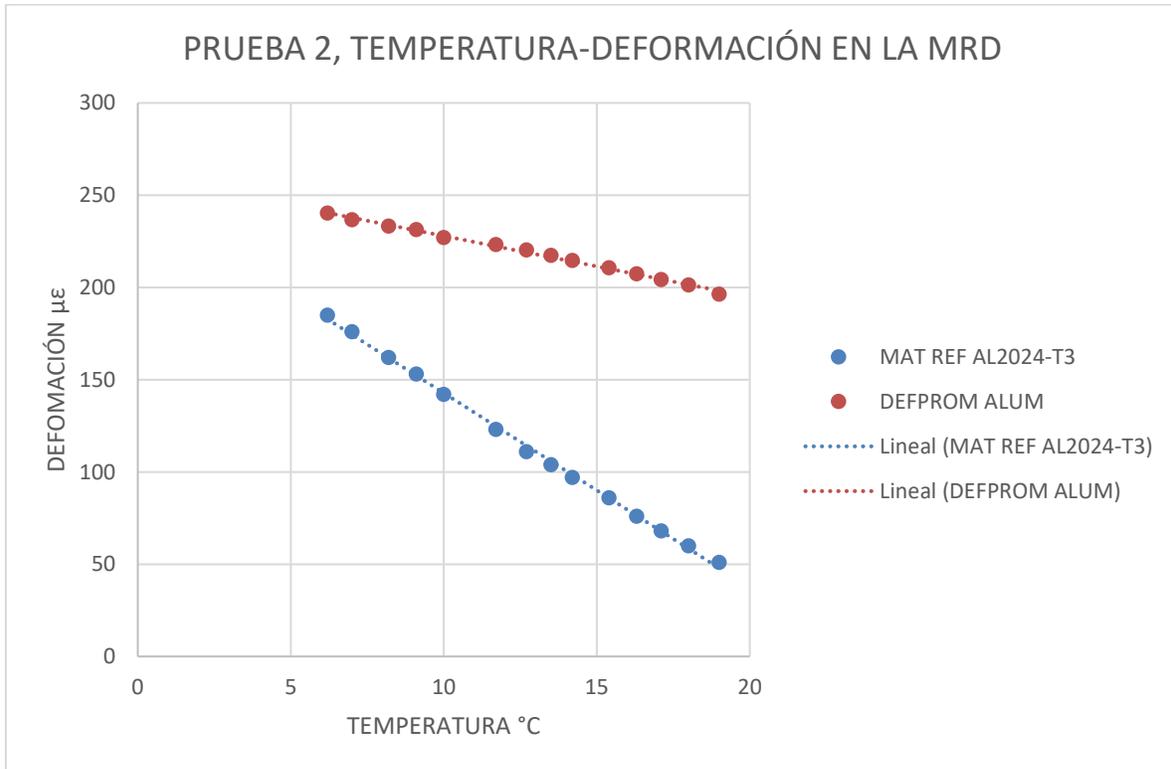


Figura 3.22. Gráfica Deformación-Temperatura, prueba 2, MRD

Capítulo IV

RESULTADOS

Los resultados relacionados con este trabajo de tesis, se desglosan de la siguiente forma:

1. Resultados relacionados con el Sistema de Refrigeración Didáctica (SRD), el cual está constituido de: a) La Máquina de Refrigeración Didáctica (MRD); b) un conjunto de sensores; c) una interfaz usuario-máquina; d) programación en LabView y Arduino.
2. Resultados relacionados con dos pruebas térmicas experimentales con diferentes materiales, esto con el fin de evaluar el funcionamiento del SRD.

4.1. Resultados relacionados con el Sistema de Refrigeración Didáctica

En esta sección se reportan los resultados obtenidos en: a) la interfaz usuario-máquina para controlar la temperatura; b) el evaporador; c) el condensador.

4.1.1. Interfaz Usuario máquina para el control de temperatura

Se diseñó e implementó una interfaz usuario-máquina (ver Figura 4.1), en lenguaje de alto nivel basado en LabVIEW para realizar el control y monitoreo de la temperatura del sistema, así como pruebas mecánicas a materiales aeronáuticos por debajo de la temperatura ambiente.

Mediante esta interfaz el usuario puede encender y apagar el equipo, para ello solo tiene que escribir en el selector de temperatura la temperatura deseada y esto encenderá automáticamente el compresor (el cual se apagará también de forma automática al llegar a

la temperatura indicada), posteriormente deberá encender el condensador y evaporador haciendo click en cada uno de los switch que se muestran bajo su nombre como se observa en la Figura 4.1, (para apagar el condensador y evaporador se da click de nuevo en cada uno de los switch).



Figura 4.1 Interfaz de control Usuario-Maquina

La interfaz también cuenta con un ajuste de tolerancia de temperatura con el fin de proteger el compresor para que este no se encienda y apague continuamente, pudiendo provocar algún fallo, este ajuste puede ser calibrado por el operador del sistema (se recomienda manejar una tolerancia de 2 °C). Una vez encendidos estos componentes el sistema encenderá una luz verde debajo del nombre de cada uno.

La interfaz también despliega numéricamente y por bloques las temperaturas que integran el sistema, estas son:

- ✚ Bloque 1: Ambiente, Interior cámara y la diferencia entre ellas.
- ✚ Bloque 2: (subenfriamiento del sistema): Radiador evaporador (Salida del evaporador), Ventilador evaporador (entrada del evaporador) y diferencia entre ellas.
- ✚ Bloque 3 (sobrecalentamiento del sistema): Radiador condensador (entrada del condensador), Ventilador condensador (salida del condensador) y diferencia entre ellas.

Debido a su importancia, en la parte central de la interfaz se despliega de nuevo, pero en tamaño más grande, la temperatura interior de la cámara y adicionalmente al costado derecho es mostrada nuevamente mediante un termómetro, con el fin de hacer más visual el cambio en la temperatura. De manera adicional esta interfaz también puede monitorearse de manera remota mediante la red inalámbrica local como se muestra en la Figura 4.2.

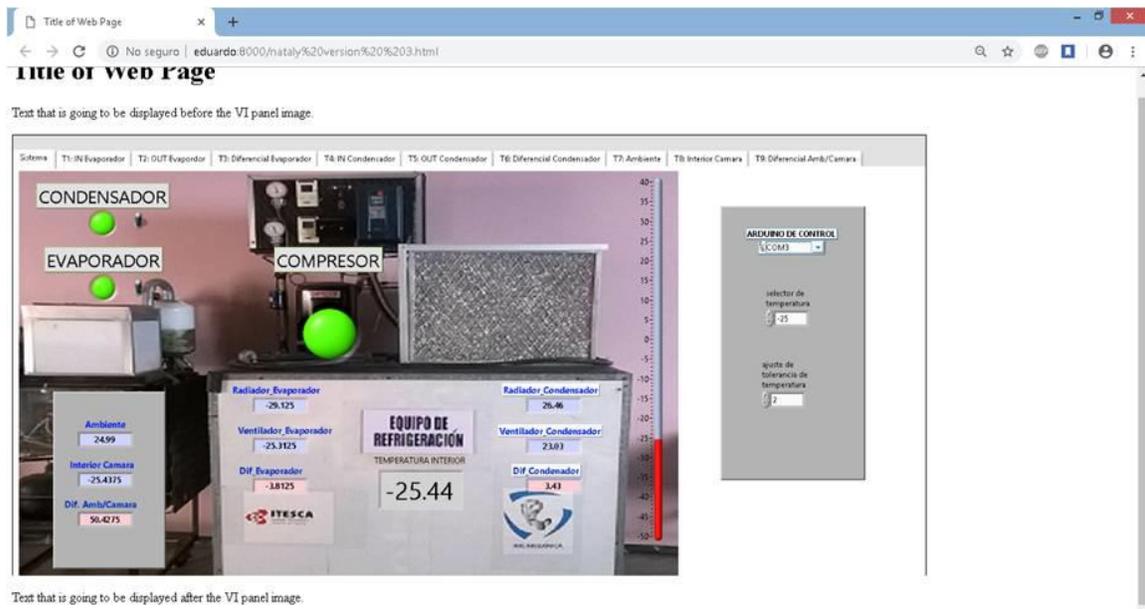


Figura 4.2. Interfaz de control Usuario-Maquina monitoreada desde Google Chrome

De esta manera distintos dispositivos pueden monitorear el sistema mediante la interfaz ya creada, con tan solo poner la dirección URL que proporciona LabVIEW en el navegador de internet.

Esta interfaz permite también observar mediante graficas los cambios en las temperaturas de todos los parámetros antes mencionados, cada gráfica es desplegada en su propia pestaña dentro de la interfaz. A continuación, se muestra cada una de ellas y su función dentro del sistema.

4.1.2. Gráficas del evaporador

Para observar el comportamiento térmico a la entrada y salida del evaporador, así como el subenfriamiento del sistema, son desplegadas tres gráficas a partir de la segunda pestaña de la interfaz de manera consecutiva. En ellas se puede observar como la temperatura va disminuyendo conforme pasa el tiempo (Figuras 4.3 y 4.4) y como la diferencia entre la entrada y la salida del evaporador es cada vez mayor (Figura 4.5) ya que como se observa en la Figura 4.1. la temperatura de entrada del evaporador es menor que la de salida, esta diferencia en promedio una vez establecido el sistema ronda alrededor de 6°C .

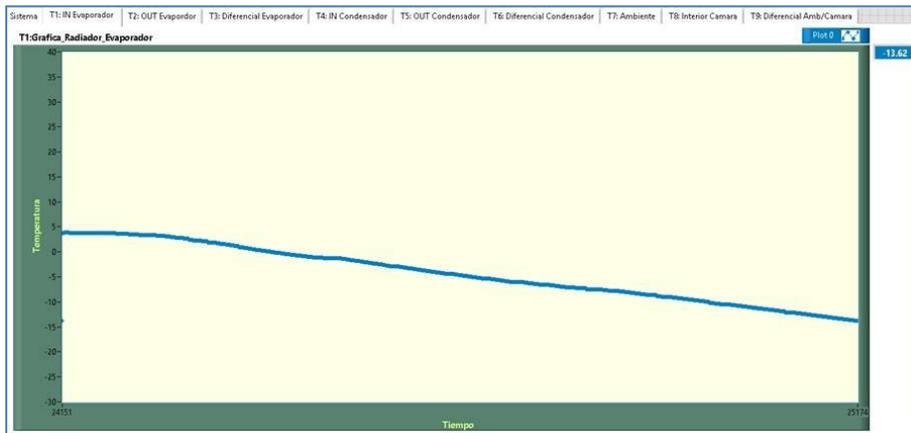


Figura 4.3. Gráfica de la entrada del evaporador



Figura 4.4 Gráfica de la salida del evaporador

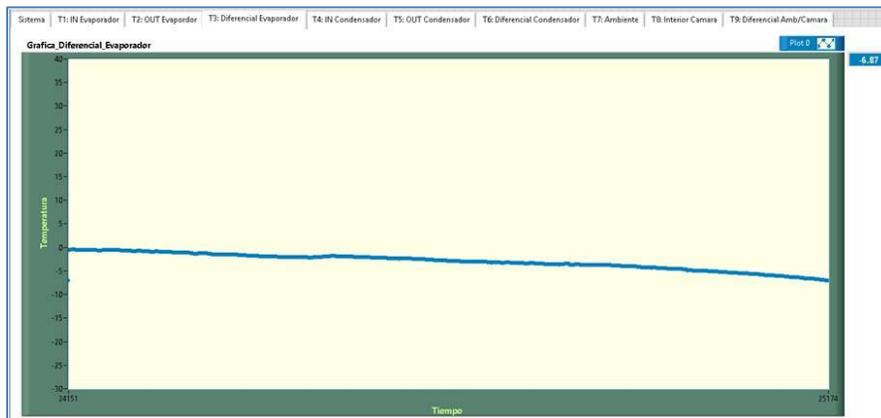


Figura 4.5. Gráfica de la diferencia entre la entrada y la salida del evaporador

4.1.3. Gráficas del Condensador

En las gráficas de esta sección se puede observar como a la salida del condensador la temperatura se muestra estable (Figura 4.6) y como la temperatura registrada en el panel o entrada del condensador aumenta con el tiempo (Figura 4.7). Eso se debe a que en la salida el ventilador introduce aire a temperatura ambiente, pero al atravesar el panel existe un intercambio de temperatura entre el aire del ambiente y el gas en el panel, por lo que la temperatura varía. En cuanto a la gráfica de diferencia entre la entrada y la salida (Figura 4.8) se puede observar que la temperatura no varía mucho y oscila entre más menos cinco grados centígrados.

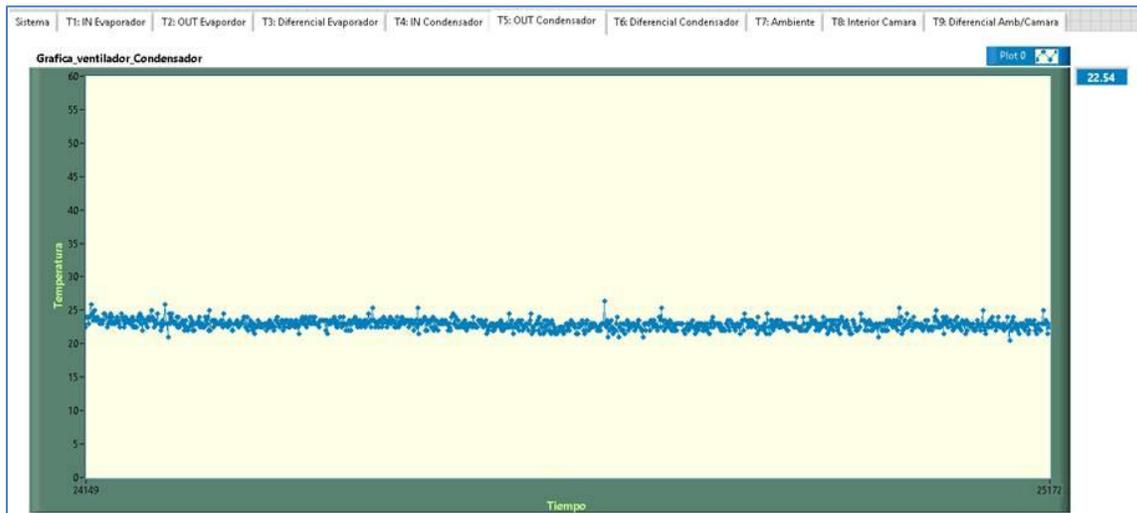


Figura 4.6. Gráfica de la salida del condensador

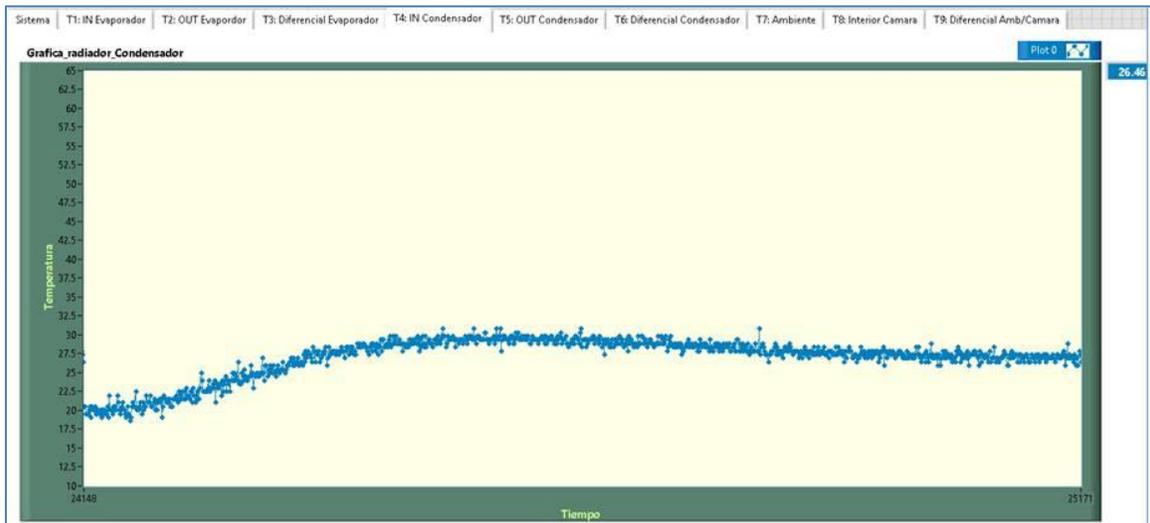


Figura 4.7. Gráfica de la entrada del condensador

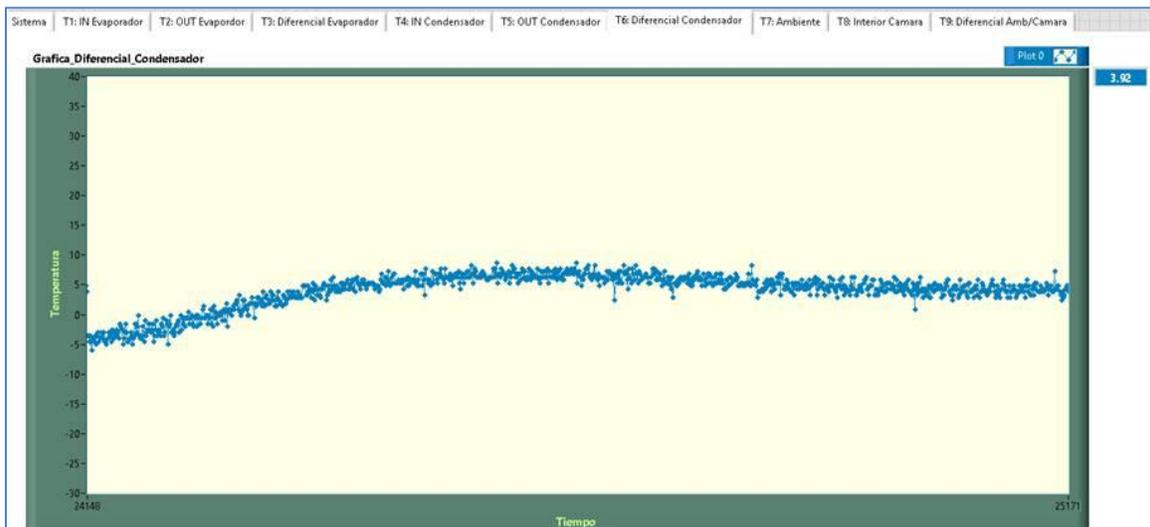


Figura 4.8. Gráfica de la diferencia entre la entrada y salida del Condensador

4.1.4 Gráficas de las temperaturas: ambiente, interior de la cámara y diferencia entre ambas

En las gráficas de esta sección se despliega primeramente la gráfica de la temperatura ambiente (Figura 4.9), la cual es una variable que no se puede controlar mediante este sistema, por lo que únicamente se despliega la lectura del sensor a tiempo real. Posteriormente se despliega la gráfica correspondiente a la temperatura de la cámara interior, como se muestra en la Figura 4.10 la temperatura disminuye con el tiempo esto se debe a que el sistema está en funcionamiento.

Finalmente, como se muestra en la Figura 4.11, en la última pestaña de la interfaz se despliega la gráfica de la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura interior de la cámara, en ella se puede observar como la diferencia entre la temperatura en el interior de la cámara aumenta con respecto a la temperatura ambiente. Esto se debe a que la temperatura dentro de la cámara disminuye rápidamente conforme pasa el tiempo para llegar a la temperatura programada, pero la temperatura ambiente se mantiene constante debido al comportamiento del clima al efectuar la prueba.

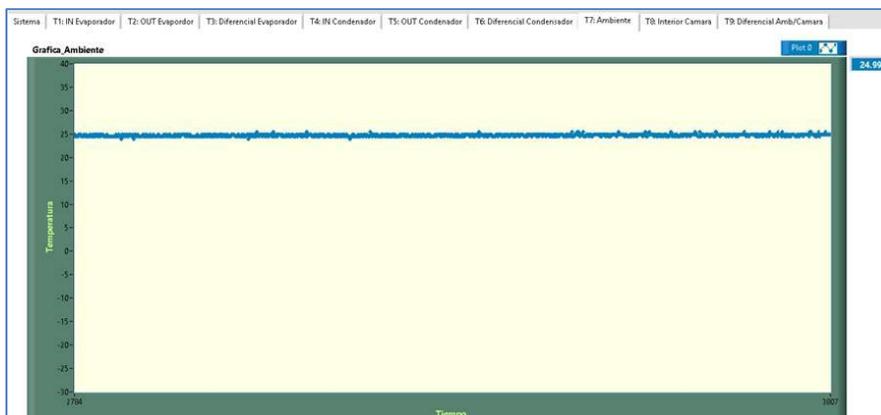


Figura 4.9. Gráfica. Temperatura ambiente



Figura 4.10. Gráfica. Temperatura interior de la cámara de refrigeración

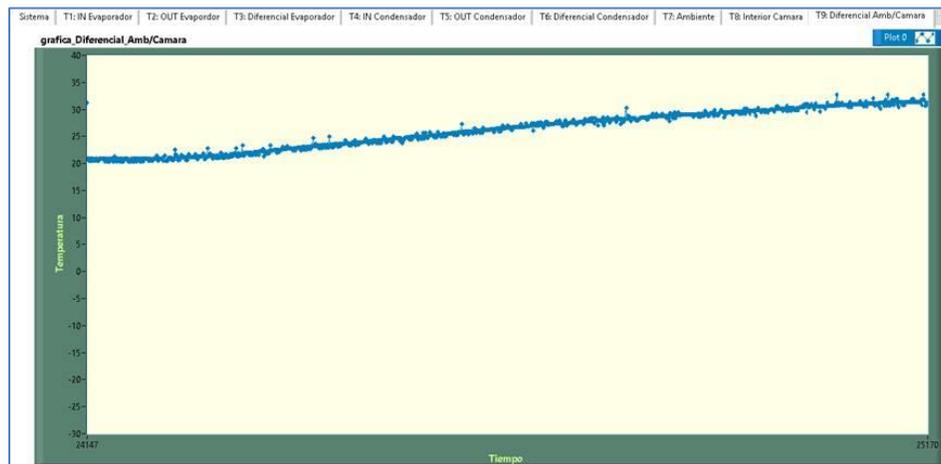


Figura 4.11. Gráfica. Diferencia entre temperatura ambiente y cámara de refrigeración

4.2. Resultados de las pruebas térmicas experimentales con diferentes materiales

De las pruebas experimentales llevadas a cabo en el interior de la cámara de SRD, se obtienen como resultado, los Coeficientes de Expansión Térmica (CET) de los materiales

aeronáuticos. Para lograr esto se determinan los cambios de temperatura y los cambios de deformación correspondientes. Estos se sustituyeron en el modelo matemático respectivo dado por la Ecuación 4.1.

$$\alpha_S = \alpha_R + \frac{\varepsilon_{T/O(G/S)} - \varepsilon_{T/O(G/R)}}{\Delta T} \quad (4.1)$$

Donde: α_S es el CET del material de prueba, en este caso el aluminio; α_R es el CET del material de referencia, el cual fue un aluminio 2024-T3; $\varepsilon_{T/O(G/S)}$ y $\varepsilon_{T/O(G/R)}$ son las deformaciones térmicas obtenidas referidas al cambio de temperatura, en el material de prueba y el material de referencia respectivamente; ΔT es el cambio de temperatura.

Como se llevaron a cabo dos pruebas con grupos de materiales diferentes, los resultados relacionados con estas, son:

1. Coeficientes de expansión térmica resultantes de la prueba 1.
2. Coeficientes de expansión térmica resultantes de la prueba 2.

Para obtener los resultados relacionados con los coeficientes de expansión térmica (CET), el proceso es el siguiente:

- a) A partir de los datos obtenidos en las Tablas 3.1 y 3.2, se determinan los cambios de temperatura y las deformaciones respectivas.
- b) Utilizando la Ecuación 4.1, se obtienen CET relacionados con cada cambio de temperatura.
- c) Eliminando el valor más alto y el más bajo, se obtiene los CET promedio de cada material de prueba.

4.2.1. CET resultantes de la prueba 1

Como se menciona en el inciso 3, tres probetas fueron utilizados en esta prueba fueron: a) una de Fibra de Carbono, instrumentada en forma longitudinal y transversal; b) una de plástico instrumentada en dirección longitudinal; y c) una de acero inoxidable 308. A las dos primeras se les conoce como materiales de prueba y la última es conocida como material de referencia debido a que está plenamente identificada y cuyo CET a temperaturas entre 0 y 100°C es 17.3 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$. Los cambios de temperatura, las deformaciones correspondientes y los CET relacionados cada cambio, y el CET promedio de cada material, se observan en la Tabla 4.1, y en la Figura 4.12, se muestra la relación relacionada con los cambios de temperatura y deformación.

Tabla 4.1. Prueba 1, CET resultantes de materiales de FC y plástico

MATERIALES DE PRUEBA					COEFICIENTES DE EXPANSIÓN TÉRMICA		
	ACINOX 304	FIBRA DE CARBONO		PLASTICO	α_{FCL}	α_{FCT}	α_{PL}
ΔT °C	ϵ_{AIXR} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{FCLP} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{FCTP} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{PLP} ($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)	($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)	($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)
0	0	0	0.00	0			
-2	12	33.0	38.0	66.0	7.20	4.70	-9.30
-4	27	59.0	70.0	130.0	9.70	6.95	-8.05
-5	34	74.0	93.0	158.0	9.70	5.90	-7.10
-7	50	106.0	130.0	225.0	9.70	6.27	-7.30
-9	68	135.0	163.0	277.0	10.26	7.14	-5.52
-10	79	152.0	178.0	312.0	10.40	7.80	-5.60
				SUMA	39.36	26.27	-28.05
				PROMEDIO	9.84	6.57	-7.48

Dónde: ϵ_{AIXR} es la deformación longitudinal o en x, del material de referencia; ϵ_{FCLP}

y ε_{FCTP} , son deformación longitudinal y transversal promedio de la probeta de fibra de carbono (FC); ε_{PLP} son las deformaciones longitudinales promedio de la probeta de plástico; ΔT es el cambio de temperatura; α_{FCL} y α_{FCT} son los coeficientes de expansión térmica longitudinal y transversal de la probeta de fibra de carbono respectivamente; α_{PL} es el coeficiente de expansión térmica longitudinal de la probeta de plástico.

Nota: Los valores promedios de los coeficientes de expansión térmica se obtuvieron eliminando el valor mínimo y los valores máximos.

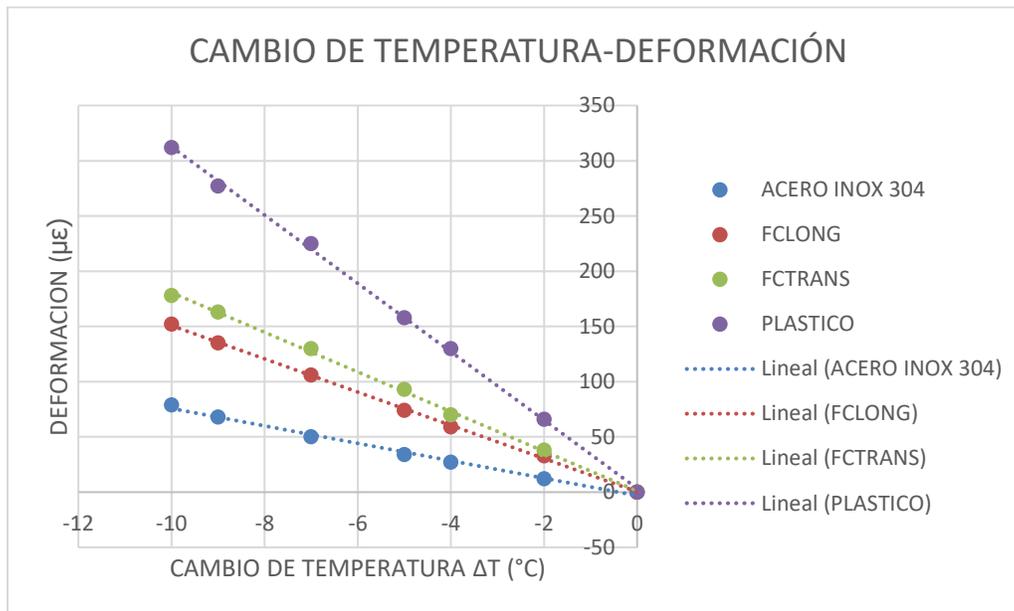


Figura 4.12. Gráfica $\Delta T - \Delta \epsilon$ Prueba 1

4.2.2. CET resultantes de la prueba 2

En esta prueba se usaron dos probetas: a) una de aluminio de 25.4 mm de ancho y 12 mm de espesor, instrumentada en tres direcciones (x,y,z), conocido como material de prueba; b) una de aluminio aeronáutico AL2024-T3, de 30.95 mm de ancho por 0.635 mm de espesor, instrumentada en dirección longitudinal, conocida como material de referencia

cuyo CET para temperaturas entre 20 y 100°C es ($\alpha_{2024} = 23.2 \mu\epsilon/^\circ C$); y para temperaturas entre -50 y 20°C, el CET es ($\alpha_{2024} = 21.1 \mu\epsilon/^\circ C$), los cambios de temperatura, las deformaciones correspondientes, los CET relacionados cada cambio, y el CET promedio de cada material, se observan en la Tabla 4.2. En la misma Tabla 4.2, debido a que se observa que las deformaciones en las tres direcciones son parecidas, por lo que se obtiene una deformación promedio con la cual se genera la Figura 4.13, donde se muestra la relación de los cambios de temperatura y la mencionada deformación.

De acuerdo con [12], en un material continuo, homogéneo, isotrópico y linealmente elástico, cuando es sometido a cambio de temperatura controlada y si esta es homogénea, las deformaciones térmicas resultantes son las mismas en todas direcciones medidas. Por lo que bastaría medir la deformación en una sola dirección para determinar el CET del material en cuestión.

Tabla 4.2. Deformación promedio resultante de la prueba 2

		AL 2024-T3	MATERIAL DE PRUEBA ALUMINIO			PROMEDIO
T °C	ΔT °C	$\epsilon_{AL2024R}$ ($\mu\epsilon$)	ϵ_{ALXP} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{ALYP} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{ALZP} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{ALPP} ($\mu\epsilon$)
19	0	0	0	0	0	0.00
18	-1	9	5	5	5	5.00
17.1	-1.9	17	8	8	8	8.00
16.3	-2.7	25	11	11	11	11.00
15.4	-3.6	35	14	14	15	14.33
14.2	-4.8	46	19	19	20	19.33
13.5	-5.5	53	23	23	23	23.00
12.7	-6.3	60	25	25	25	25.00
11.7	-7.3	72	27	27	27	27.00
10	-9	91	30	30	30	30.00
9.1	-9.9	102	34	35	35	34.67
8.2	-10.8	111	37	37	37	37.00
7	-12	125	40	40	40	40.00
6.2	-12.8	134	43	44	45	44.00

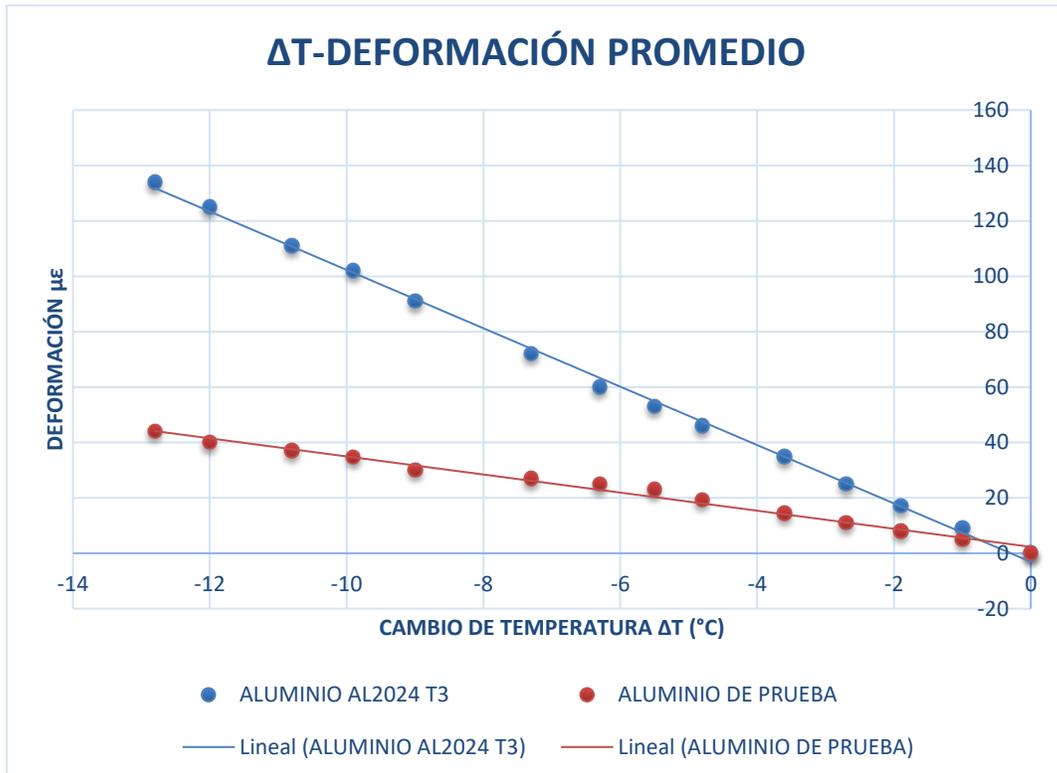


Figura 4.13. Gráfica cambio de temperatura deformación promedio del aluminio, prueba 2

En la Tabla 4.3, generada a partir de la Tabla 4.13, se observan: los datos del cambio de temperatura; deformación de referencia; y deformación promedio, y con ellos se calculan los CET del material de prueba. En la misma Tabla 4.3, se calcula el CET promedio.

Nota: las mediciones de las deformaciones se llevaron a cabo en el puente P3-Strain Recorded, en conexión de cuarto de puente.

Tabla 4.3. Prueba 2, resultado CET aluminio

TEMP.	AL 2024-T3	MP (ALUM)	CET ALUMINIO
ΔT °C	$\varepsilon_{T/0(G/R)}$ ($\mu\varepsilon$)	$\varepsilon_{T/0(G/S)}$ ($\mu\varepsilon$)	α_{ALS} ($\mu\varepsilon/^\circ C$)
0	0	0.00	0
-1	9	5.00	25.1
-1.9	17	8.00	25.8
-2.7	25	11.00	26.3
-3.6	35	14.33	26.8
-4.8	46	19.33	26.7
-5.8	53	23.00	26.3
-6.3	60	25.00	26.7
-7.3	72	27.00	27.3
-9	91	30.00	27.9
-9.9	102	34.67	27.9
-10.8	111	37.00	28.0
-12	125	40.00	28.2
-12.8	134	44.00	28.1
		SUMA	297.7
		PROMEDIO	27.06

Dónde: $\varepsilon_{T/0(G/R)}$ son las deformaciones medidas en el material de referencia (Aluminio 2024-T3); $\varepsilon_{T/0(G/S)}$ son las deformaciones medidas en el material de prueba (Aluminio desconocido); α_{ALS} es el coeficiente de expansión térmica del Aluminio de prueba.

4.2.3. Análisis de Resultados

Los CET ($\mu\varepsilon/^\circ C$) obtenidos en las dos pruebas relacionados con los materiales utilizados se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Coeficientes de Expansión Térmica Resultantes pruebas 1 y 2

Material	CET α_{FCL} $\mu\varepsilon/^\circ C$	CET α_{FCT} $\mu\varepsilon/^\circ C$	CET α_{ALS} $\mu\varepsilon/^\circ C$
Fibra de Carbono	9.84	6.57	
Plástico	-7.1		
Aluminio de prueba			27.06

Comparación con CET de las bases de dato

De acuerdo a la base de datos Matweb [20], establece que el CET para un aluminio ejemplo el 6061, para temperaturas entre 20 y 100°C, el valor es 23.6 ($\mu\text{m/m}$) /°C, para rango entre 20 y 300°C su valor es 25.2 ($\mu\text{m/m}$) /°C, en Matweb también, para un material compuesto de fibra de carbono Carlisle 201LD y Carlisle 201LL (Carbon-Carbon Composite) establece que el CET longitudinal es 1.9 ($\mu\text{m/m}$) /°C y el transversal 9.3 ($\mu\text{m/m}$) /°C, para temperaturas entre 23 y 1500°C. Para plástico no se encontraron datos.

Nota importante: en las bases de datos existentes en la Web no se encontraron valores de *coeficientes de expansión térmica a temperaturas inferiores a la temperatura ambiente*, por lo que se puede establecer una comparación. De todas formas, en la Tabla 4.5, se muestran los CET experimentales obtenidos en esta tesis a temperaturas entre 19 y 6.2 °C, y los obtenidos en la base de datos MatWeb, a temperaturas superiores al ambiente, es decir, arriba de 20°C, como se muestra en las columnas de color naranja en la Tabla.

Tabla 4.5. CET experimentales y de las bases de datos

MATERIAL	CET LONG. $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$		CET TRANS. $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$		CET PROM $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$	
	19 Y 6.2°C	20 Y 100°C	19 Y 6.2°C	20 Y 100°C	19 Y 6.2°C	20 Y 100°C
FIBRA DE CARBONO	9.84 DE PRUEBA	1.9 Carlisle 201LD	6.57 DE 'PRUEBA	9.3 Carlisle 201LD		
ALUMINIO	27.06 DE PRUEBA	23.6 6061-0	27.06 DE PRUEBA	23.6 6061-0	27.06 DE PRUEBA	23.6 6061-0
PLASTICO	-7.1	SIN DATOS				

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Mediante este proyecto se logró desarrollar una interfaz dinámica capaz de controlar la Máquina de Refrigeración Didáctica con la que cuenta el programa de licenciatura de Ingeniería Mecánica de ITESCA, convirtiéndose en un Sistema de Refrigeración Didáctico completo y robusto el cual permite desde una computadora encender y apagar el equipo, monitorear los diversos componentes del sistema de refrigeración, tanto de manera numérica como gráfica y realizar pruebas de deformación mecánica. Todo ello de manera segura y sencilla para que los alumnos hagan uso del equipo en las diferentes materias en las que aplique, bajo la guía y supervisión de sus maestros.

De esta manera ahora se encuentra con un banco didáctico mecatrónico capaz de beneficiar al programa de la licenciatura de Ingeniería Mecánica y así mismo, al área de Posgrado en Mecatrónica.

Por lo anterior se concluye, que se cumplió con el objetivo general y los objetivos específicos a), b), c), y d).

Al llevarse a cabo las pruebas experimentales a temperaturas inferiores a 20°C y obtenerse resultados, se cumplieron los objetivos específicos e) y f).

No se pudo establecer comparaciones con los CET de las bases de datos, porque solo existen valores para temperaturas por encima de 20 °C.

5.2 Recomendaciones

Por lo anteriormente mencionado, se recomienda seguir mejorando la maquina didáctica de refrigeración. Aunque ahora puede controlarse mediante una computadora e incluso, monitorearse y controlarse vía remota desde un celular o computadora, podría desarrollarse una investigación enfocada a convertir el sistema de refrigeración tradicional con el que cuenta la maquina en un sistema inverter que ahorre energía.

Referencias

- [1] R. Iserman, «Mechatronic systems: fundamentals,» *Springer Science Business Media*, 2007.
- [2] J. E. Vargas Soto, J. M. Ramos Arreguín y J. C. Pedraza Ortega, Ingeniería Mecatrónica Proyectos y Aplicaciones, México: Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C, 2014.
- [3] G. Aguilar Álvarez, *Control de temperatura y PH aplicado en biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala.*, PhD thesis, 2013.
- [4] J. A. Alfaya, G. Bejarano, M. G. Ortega y F. R. Rubio, «Control robusto multivariable de un ciclo de refrigeración,» de *Actas de las XXXV Jornadas de Automática*, Valencia, 2014.
- [5] A. Castro Domínguez, Sistema de control de temperatura a través de Arduino y la tecnología GPRS/GSM, 2013.
- [6] G. Bejarano, M. G. Ortega y F. R. Rubio, «Modelado simplificado y orientado al control de sistemas de refrigeración,» *XXXIV Jornada de Automática*, 2013.
- [7] W. F. Stoecker, Refrigeración y acondicionamiento de aire, México: McGraw-Hill, 1976.
- [8] R. J. Dossat, Principios de refrigeración, Continental, 1990.

- [9] R. H. Bishop, *Lerning with labview*, 1999.
- [10] P. A. Blume, *The LabVIEW style book*, Pearson Education, 2007.
- [11] «ARDUINO,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Último acceso: 2017].
- [12] J. J. Delfín Vázquez, *Análisis experimental de esfuerzos térmicos interlaminares en materiales compuestos laminados*, México, D.F.: Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), agosto 2014.
- [13] M. Acosta Flores, *Análisis Experimental de Esfuerzos en Materiales Compuestos*, México D.F.: Tesis Doctoral en la Ingeniería Mecánica, UNAM, 2010.
- [14] Micro-Measements, *Measurement of Thermal Expansion Coefficient Using Strain Gages.*, Tech Note TN-513-4.
- [15] J. J. Delfín Vázquez, J. Carrera Bolaños, M. Acosta Flores y E. Jiménez López, «Interlaminar Thermal Stress Analysis in Symetric Composite Laminated Metallic,» vol. 3, n° 1, pp. 71-83, March 2014.
- [16] J. J. Delfín Vázquez, M. Acosta Flores, E. Jiménez López, B. Lucero Velázquez y M. Montiel Gonzalez, «Modelo para el análisis de esfuerzos térmicos intralaminares en materiales compuestos laminados,» *Dyna Ingeniería e Industria*, vol. 94, n° ISSN 0012-7361, pp. 324-330, May 2019.
- [17] L. Datasheet, «Lm35 precision centigrade temperature sensors,» Retrieved September 13th, 2017..

- [18] J. Delfin, J. Carrera, M. Acosta, E. Jiménez, J. Tzab, E. García y I. Gamboa, «Didactic cooling machine development for deformations measuring in simple structures,» *In Paper 52, Internacional Conference on Engineering Educatio and Research 2013*, n° ISBN: 978-9954-9091-2-6, 1July - 5 July 2013, Marrakesh.
- [19] L. R. Cárdenas Campos, «Construcción y análisis experimental y por elemento finito compuesto fc-fv-fc y fv-fc-fv, para construcción de un cuadróptero de monitore de cultivos,» *Mathesis, Instituto Tecnológico Superior de Cajeme*, March 2019.
- [20] M. P. Data, «MatWeb,» 1996. [En línea]. Available: <http://www.matweb.com>.
[Último acceso: 02 marzo 2021].