



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PORTÁTIL NO
INVASIVO PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE
REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR PARA EL
LABORATORIO DE TERMODINÁMICA DE LA FIM – EPN”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

PILLAJO PAUCAR OMAR ALEXANDER
omar.pillajo@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. ORTEGA LÓPEZ MIGUEL DARÍO, Ms.
miguel.ortega@epn.edu.ec

CODIRECTOR: Ing. NARANJO MENDOZA CARLOS ANDRÉS, PhD.
carlos.naranjo@epn.edu.ec

Quito, octubre 2022

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por **OMAR ALEXANDER PILLAJO PAUCAR**, bajo nuestra supervisión.

Ing. Miguel Darío Ortega López, MSc.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Carlos Andrés Naranjo Mendoza, PhD.
CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, Omar Alexander Pillajo Paucar, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Omar Alexander Pillajo Paucar

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a:

Primeramente a mi familia, mi papá Franklin Pillajo, porque desde pequeño siempre me inculco el pensamiento de ser siempre el mejor, perseverar sin rendirme hasta conseguir mis metas. Por la experiencia laboral formada que, desde mi primer día de trabajo, hasta el día de hoy y los siguientes días como profesional, me han enseñado no solo a estudiar Ingeniería Mecánica, sino a querer y amar la profesión que hoy en día culmino. Me da satisfacción y orgullo de todo lo que mi papá me ha enseñado, porque gracias a eso puedo cumplir el sueño que él siempre anhelaba.

A mi mamá Wilma Paucar por su gran corazón y afecto que siempre me dio en esperarme con un desayuno, un almuerzo o un café en las noches de velada. Gracias mami por preocuparse día a día de todas mis necesidades estudiantiles y quiero que se sienta feliz porque Yo como su primer hijo seguiré llenándole de más alegrías en lo que continúa de la vida.

A mis hermanos Dilan y Elian por los momentos compartidos en familia, por ayudarme cuando teníamos que distribuirnos las actividades de la casa y no alcanzaba por falta de tiempo. Niños, espero que el ejemplo que hoy en día están viendo en mí, lo mejoren y de ser posible lo superen. Los quiero.

A mi abuelita Consuelo por el apoyo a mí y mi familia, especialmente en la formación que le dejo a mi papá.

A mi abuelita María por siempre estar pendiente de mí como mi segunda mamá. Agradezco por todo el cariño brindado desde que era pequeño. Por ser el nieto que le llena de alegrías a su vida y por siempre acordarse especialmente de la fecha exacta de mi cumpleaños.

A todos mis tíos, primos, y amigos por el apoyo en toda mi carrera de formación profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme culminar una etapa más de mi vida, por nunca soltarme de la mano y siempre mantenerme firme en mi fe católica. Por no dejarme rendir cuando las cosas se ponían difíciles.

Agradezco a mis directores de tesis, Ingeniero Miguel Ortega e Ingeniero Carlos Naranjo, por el apoyo y conocimiento compartido para que este proyecto se haya culminado satisfactoriamente. Agradezco por la enseñanzas y buenas experiencias compartidas, no solo en este trabajo de titulación, sino también en las materias en las cuales estuve bajo su tutoría. Espero continúen compartiendo su conocimiento a las demás generaciones de estudiantes con esa pasión y don de enseñanza que han adquirido.

Especialmente, agradezco a Eduardo por ser ese amigo infalible que siempre me apoyo, como se dice en las buenas, en las malas y las peores. Gracias por los consejos y por la confianza que depositaste en mí. Éxitos Edu en tu vida profesional eres una calidad de persona.

Agradezco de igual manera a mi amiga Giss que desde primer semestre fuiste esa amiga incondicional que, aunque los primeros meses no nos conocíamos, con el tiempo tu carisma, tu calidad de persona y tu fortaleza de mujer mecánica hizo formar un vínculo fraterno de amistad y buen compañerismo. Nunca decaigas amiga.

Agradezco a Pablito, Pablo Chispun, César, Ariel, Andrés, Luis, Nico N., Nico M., Less, Sebas, Miguel y los demás amigos por todos los buenos momentos compartidos. Agradezco al grupo MEC de WhatsApp, por todas las conversaciones que día a día me sacaban una sonrisa al molestarnos entre todos.

Agradezco también a mi amiga Liss de Ambiental, por ser esa mujer muy confidente y tranquila. Por estar pendiente de mí y mis estudios. Por ser la persona que para disfrutar de un momento divertido no había necesidad de gastar mucho dinero. Siempre estaré agradecido por la personalidad que tuviste al compartir momentos de amistad conmigo.

Finalmente, agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica, porque día tras día fue formando un hombre de valor, que, mediante esfuerzo y sacrificio, formó un GUAYPERO el cual sale a dar lo mejor en el ámbito profesional y demostrando que la EPN forma los mejores profesionales a la sociedad.

ÍNDICE

1.	MARCO TEÓRICO	4
1.1.	Evaluación energética en sistemas de refrigeración	4
1.2.	Monitoreo y control de sistemas de refrigeración	5
1.2.1.	Monitoreo básico	5
1.2.2.	Monitoreo avanzado	7
1.3.	Refrigerantes.....	10
1.3.1.	Refrigerante R-600a (Isobutano)	11
1.3.2.	Refrigerante R-134a (Tetrafluoroetano).....	11
1.3.3.	Refrigerante R-290 (Propano).....	12
1.4.	Instrumentación en equipos	12
1.4.1.	Sensores de temperatura.....	12
1.4.2.	Dispositivos de control y almacenamiento de información.....	15
1.5.	Programación y uso de interfaces gráficas en refrigeración.....	17
1.5.1.	Programación en controladores	18
1.5.2.	Programación de interfaces gráficas de usuario	18
2.	METODOLOGÍA	22
2.	24
2.1.	Definición de parámetros.....	25
2.2.	Ubicación de instrumentos según referencias bibliográficas.....	27
2.3.	Definición de variables y pruebas experimentales para identificar lugares apropiados para la lectura de datos	30
2.3.1.	Pruebas en el compresor	30
2.3.2.	Pruebas en el condensador	36
2.3.3.	Pruebas en el tubo capilar.....	39
2.3.4.	Pruebas en el evaporador	43
2.4.	Ecuaciones termodinámicas asociadas a los ciclos de refrigeración.....	45
2.4.1.	Ecuaciones para el calor de entrada y salida	46
2.4.2.	Ecuación para el trabajo del compresor	47
2.4.3.	Ecuación del coeficiente de desempeño (COP).....	48
2.5.	Selección de instrumentos.....	49
2.5.1.	Selección de sensores	49
2.5.2.	Selección de controladores	54
2.6.	Selección del lenguaje y desarrollo del software	59
2.6.1.	Selección del lenguaje de programación	59
2.6.2.	Librerías en Python	60
2.6.3.	Desarrollo del software.....	63

2.7.	Diseño del equipo de medición	80
2.8.	Construcción del equipo	83
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	87
3.1.	Resultados	87
3.1.1.	Pruebas preliminares en el equipo Chiller de la ESFOT	87
3.1.2.	Pruebas preliminares en el equipo de refrigeración del laboratorio de termodinámica.....	96
3.1.3.	Pruebas preliminares en el equipo Split del laboratorio de termodinámica 103	
3.1.4.	Prueba concluyente para los equipos evaluados.....	109
3.2.	Discusión.....	113
3.2.1.	Discusión de resultados para el equipo Chiller.....	113
3.2.2.	Discusión de resultados preliminares para el equipo de refrigeración del laboratorio de termodinámica FIM	114
3.2.3.	Discusión de resultados preliminares para el equipo Split del laboratorio de termodinámica.....	114
3.2.4.	Discusión de resultados concluyentes para los equipos evaluados	115
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
4.1	Conclusiones.....	115
4.2	Recomendaciones	117
Anexos		122
ANEXO I.....		122
ANEXO II.....		133
ANEXO III.....		139
ANEXO IV		143
ANEXO V		145
ANEXO VI		155
ANEXO VII		158
ANEXO VIII		161
ANEXO IX		162
ANEXO X		174
ANEXO XI		183
ANEXO XII		192
ANEXO XIII		197
ANEXO XIV.....		199

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Diagrama esquemático del equipo de prueba y su configuración.....	6
Figura 1. 2 Banco de refrigeración creado por Coumaressin T.	7
Figura 1. 3 Banco de refrigeración creado por Subramani N.	7
Figura 1. 4 Monitoreo con data logger en un sistema de refrigeración.....	8
Figura 1. 5 Diagrama P&ID desarrollado para el monitoreo del sistema de refrigeración usando Microcontrolador.....	9
Figura 1. 6 Módulo de termocuplas acoplado al Compac Río	9
Figura 1. 7 Clasificación de refrigerantes según la ASHRAE 34.	10
Figura 1. 8 Clasificación e identificación de termopares según ANSI/MC96.1	13
Figura 1. 9 Instalación y montaje de termoresistores externos.....	14
Figura 1. 10 Termómetro digital con sonda	15
Figura 1. 11 Ejemplo de recolector de datos HP data logger.....	16
Figura 1. 12 Esquema de una placa Arduino UNO.	16
Figura 1. 13 Esquema de partes de un PLC marca Logo de SIEMENS	17
Figura 1. 14 Interfaz gráfica de captura de datos de un ciclo de refrigeración creada mediante programación en LabVIEW.	19
Figura 1. 15 Software R290 para el diseño de plantas de refrigeración generado mediante Visual Basic.	19
Figura 1. 16 RefriTerm para ciclos de refrigeración creada con MATLAB	20
Figura 1. 17 Ejemplo de programación en Python utilizando la librería Coolprop	20
Figura 1. 18 Ejemplo de programación en EES para ciclos termodinámicos.	21
Figura 2. 1 Procedimiento metodológico para el desarrollo del trabajo experimental ..	24
Figura 2. 2 Ciclo ideal de refrigeración	25
Figura 2. 3 Ciclo real de refrigeración.....	25
Figura 2. 4 Diagrama T-s simplificado según los puntos importantes del sistema.....	27
Figura 2. 5 Esquema del circuito de refrigeración	27
Figura 2. 6 Toma de datos en un sistema RAC con R-134a.....	28
Figura 2. 7 Diagrama esquemático de la configuración experimental	29
Figura 2. 8 Diagrama esquemático de la unidad de pruebas y los aparatos.....	29
Figura 2. 9 Esquema de ubicación de termopares en compresor y la tubería de absorción.	31
Figura 2. 10 Diagrama temperatura vs tiempo del compresor y tubo de absorción	31
Figura 2. 11 Esquema de la ubicación de termopares en el tubo de absorción	32
Figura 2. 12 Diagrama temperatura vs tiempo en el tubo de absorción	32
Figura 2. 13 Diagrama temperatura vs distancia para el tubo de absorción	33
Figura 2. 14 Esquema de ubicación de termocuplas en el compresor y tubería de descarga	33

Figura 2. 15 Diagrama temperatura vs tiempo en el compresor y tubo de descarga...	34
Figura 2. 16 Esquema de ubicación de termopares en el tubo de descarga.....	34
Figura 2. 17 Diagrama temperatura vs tiempo en el tubo de descarga.....	35
Figura 2. 18 Diagrama de temperatura vs distancia en el tubo de descarga.	35
Figura 2. 19 Geometría del condensador	36
Figura 2. 20 Tramos y ubicación de termopares en el condensador	37
Figura 2. 21 Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 1	37
Figura 2. 22 Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 2	38
Figura 2. 23 Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 3	38
Figura 2. 24 Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 4	38
Figura 2. 25 Configuraciones para intercambiadores de calor con tubos capilares	40
Figura 2. 26 Arreglos en el sistema con el tubo capilar.....	40
Figura 2. 27 Ubicación de termopares en el tubo capilar no enrollado.....	41
Figura 2. 28 Diagrama temperatura vs tiempo en el tubo capilar	41
Figura 2. 29 Ubicación de termopares en el intercambiador de calor y el tubo de absorción	42
Figura 2. 30 Diagrama temperatura vs tiempo en el intercambiador de calor	42
Figura 2. 31 Ubicación de termopares en el evaporador	43
Figura 2. 32 Resultados obtenidos en las pruebas del evaporador.....	44
Figura 2. 33 Ubicación de puntos de lectura en el diagrama de componentes.....	45
Figura 2. 34 Diagrama T-s para un ciclo real de refrigeración.....	46
Figura 2. 35 Programación para el cálculo de propiedades con Coolprop	61
Figura 2. 36 a) Diagrama P-h realizado en Coolprop, b) Diagrama P-h realizado en Fluprodia.....	62
Figura 2. 37 Metodología para la programación en el IDE de Arduino	64
Figura 2. 38 Programación para lectura de datos entre Arduino y Python	64
Figura 2. 39 Datos obtenidos de Arduino usando Python	64
Figura 2. 40 Programación para eliminar signos y símbolos innecesarios.....	65
Figura 2. 41 Datos de temperatura enlistados para el uso en Python	65
Figura 2. 42 Cálculo de propiedades en el estado 3 del refrigerante	66
Figura 2. 43 Cálculo de propiedades en el estado 1 del refrigerante	66
Figura 2. 44 Diagrama T – s del ciclo ideal de refrigeración con dos estados	67
Figura 2. 45 Programación de ecuaciones para resultados ideales del sistema.....	67
Figura 2. 46 Diagrama T - s real del ciclo de refrigeración con seis estados	68
Figura 2. 47 Diagrama T – s de un ciclo de refrigeración real con enfriamiento	69
Figura 2. 48 Diagrama T – s del ciclo real de refrigeración con subenfriamiento y recalentamiento	70
Figura 2. 49 Dirección del fluido entre el tubo capilar y el tubo de absorción.....	70
Figura 2. 50 Transferencia de calor entre el tubo capilar y el tubo de absorción	71

Figura 2. 51 Geometría del intercambiador de calor entre tubo capilar y tubo de absorción	71
Figura 2. 52 Diagrama T – s del ciclo real de refrigeración con enfriamiento, recalentamiento y pérdida de energía.	72
Figura 2. 53 Programación en Python para arreglos de subenfriamiento, recalentamiento y pérdida de energía.....	73
Figura 2. 54 Proceso de compresión isotérmica e isentrópica.....	73
Figura 2. 55 Proceso de compresión politrópica	74
Figura 2. 56 Linealización de estados para los diferentes casos de compresión.....	74
Figura 2. 57 Programación en Python para cálculo de resultados reales del ciclo con refrigerante R600a.....	75
Figura 2. 58 Configuración de estados iniciales y finales para proceso isobárico en el ciclo ideal.....	76
Figura 2. 59 Ciclo ideal de refrigeración usando Fluprodia	76
Figura 2. 60 Ciclo real de refrigeración usando Fluprodia.....	77
Figura 2. 61 Programación para crear línea individual del ciclo de refrigeración ideal entre los estados 3 y 5	78
Figura 2. 62 Ciclo ideal y real de refrigeración usando Fluprodia	78
Figura 2. 63 Interfaz gráfica Cooling Cycle Tester (CCT)	79
Figura 2. 64 Programación del tamaño y posicionamiento de la ventana	79
Figura 2. 65 Esquema del prototipo inicial.....	81
Figura 2. 66 Diseño de placa PCB en Proteus	81
Figura 2. 67 Prototipo electrónico final	82
Figura 2. 68 Diseño del Prototipo electrónico en 3D	82
Figura 2. 69 Diseño del conector hembra para termopar en 3D	82
Figura 2. 70 Ubicación espacial de componentes en el estuche	83
Figura 2. 71 a) Base del estuche; b) Tapa del estuche.....	83
Figura 2. 72 Metodología para el construir el equipo final del proyecto	84
Figura 2. 73 Geometría de pinza para impresión 3D	86
Figura 2. 74 Prototipo final del proyecto	86
Figura 3. 1 Equipo de refrigeración Chiller	87
Figura 3. 2 Diagrama de instrumentación en el equipo Chiller	88
Figura 3. 3 Diagrama de conexión entre filtro deshidratador y válvula de expansión ..	91
Figura 3. 4 Ubicación de estados en el equipo Chiller	92
Figura 3. 5 Ajuste con temperatura de recalentamiento en CCT.....	94
Figura 3. 6 Diagrama T-s para los diferentes casos de evaluación analizados	96
Figura 3. 7 Equipo de refrigeración del laboratorio de termodinámica FIM	96
Figura 3. 8 Diagrama de instrumentación del equipo de laboratorio y ubicación de termopares para evaluar con CCT.....	97

Figura 3. 9 Configuración de subenfriamiento y recalentamiento para evaluar el sistema con CCT.....	100
Figura 3. 10 Diagrama T-s para los casos de evaluación analizados.....	102
Figura 3. 11 Equipo Split	103
Figura 3. 12 Esquema de instrumentación del equipo Split	104
Figura 3. 13 Cooling cycle tester con ajuste en la temperatura de recalentamiento..	106
Figura 3. 14 Diagrama T-s para los diferentes casos de evaluación	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades físicas del refrigerante R600a (Isobutano).....	11
Tabla 1.2 Propiedades físicas del refrigerante R-134a (Tetrafluoroetano).....	11
Tabla 1.3 Propiedades físicas del refrigerante R290 (Propano).....	12
Tabla 1.4 Características y aplicaciones de termopares tipo J, tipo K, y tipo T.....	13
Tabla 1.5 Tipos de termómetros de resistencia de platino.....	14
Tabla 2.1 Características del equipo de refrigeración utilizado para pruebas experimentales.	30
Tabla 2.2 Valores de temperatura vs distancia para el tubo de absorción.....	32
Tabla 2.3 Valores de distancia vs distancia en el tubo de descarga.....	35
Tabla 2.4 Tabla de temperaturas en el condensador.....	39
Tabla 2.5 Caída de temperatura a lo largo del tubo capilar externo.....	41
Tabla 2.6 Resultados numéricos obtenidos en el intercambiador de calor.....	43
Tabla 2.7 Temperatura promedio en diferentes puntos del evaporador.....	44
Tabla 2.8 Ponderación de los criterios de evaluación para sensores.....	50
Tabla 2.9 Ponderación de los sensores según la disponibilidad en el mercado.....	50
Tabla 2.10 Ponderación de los sensores de acuerdo al bajo costo.....	51
Tabla 2.11 Ponderación de los sensores de acuerdo al menor peso.....	51
Tabla 2.12 Ponderación de los sensores de acuerdo a su versatilidad.....	52
Tabla 2.13 Conclusiones para la selección del sensor de temperatura.....	53
Tabla 2.14 Ponderación de los criterios de evaluación para controladores.....	55
Tabla 2.15 Ponderación de los controladores según su disponibilidad en el mercado.....	55
Tabla 2.16 Ponderación de controladores de acuerdo al menor costo.....	56
Tabla 2.17 Ponderación de controladores de acuerdo al menor peso.....	56
Tabla 2.18 Ponderación de controladores de acuerdo a la facilidad de programación.....	57
Tabla 2.19 Ponderación de controladores según la versatilidad con los instrumentos.....	57
Tabla 2.20 Conclusiones para seleccionar el controlador.....	58
Tabla 2.21 Costos de los componentes del prototipo inicial.....	84
Tabla 2.22 Costos para elaboración de prototipo electrónico.....	85
Tabla 2.23 Costos de impresión en 3D del estuche.....	85
Tabla 2.24 Costo de impresión 3D de las pinzas.....	86
Tabla 3. 1 Temperaturas registradas en los termopares sin aislamiento.....	89
Tabla 3. 2 Temperaturas registradas en los termopares con uso de pasta térmica.....	89
Tabla 3. 3 Temperaturas registradas en termopares con uso de pasta térmica y aislamiento.....	90
Tabla 3. 4 Temperaturas registradas en termopares del equipo Chiller.....	90
Tabla 3. 5 Error porcentual entre los termopares para cada caso.....	91

Tabla 3. 6 Caída de temperatura en la tubería de conexión entre el filtro deshidratador y válvula de expansión	92
Tabla 3. 7 Propiedades del refrigerante según instrumentación del equipo Chiller	92
Tabla 3. 8 Resultados del sistema según la instrumentación del equipo	93
Tabla 3. 9 Propiedades del refrigerante calculados con Cooling Cycle Tester	93
Tabla 3. 10 Calculo de resultados del proceso sin ajuste	93
Tabla 3. 11 Temperatura alcanzada en el evaporador según la presión de baja.....	94
Tabla 3. 12 Propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema.....	94
Tabla 3. 13 Resultados calculados para los procesos del sistema.....	95
Tabla 3. 14 Error porcentual para cada caso de evaluación	95
Tabla 3. 15 Registro de temperaturas usando Cooling Cycle Tester	98
Tabla 3. 16 Propiedades del sistema para diferentes estados de temperatura	98
Tabla 3. 17 Resultados del ciclo evaluado con CCT sin ajustes en el sistema.....	98
Tabla 3. 18 Registro de temperaturas usando Cooling Cycle Tester	99
Tabla 3. 19 Propiedades del refrigerante en diferentes estados del ciclo	100
Tabla 3. 20 Resultados del ciclo evaluado con ajustes en CCT	100
Tabla 3. 21 Registro de temperaturas según la instrumentación del equipo.....	101
Tabla 3. 22 Propiedades para los diferentes estados del sistema.....	101
Tabla 3. 23 Resultados del ciclo evaluado según la instrumentación del equipo.....	101
Tabla 3. 24 Error porcentual en las temperaturas registradas para los diferentes casos de evaluación.....	102
Tabla 3. 25 Error porcentual para cada caso de evaluación	102
Tabla 3. 26 Registro de temperaturas mediante uso de Cooling Cycle Tester	104
Tabla 3. 27 Propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema.....	105
Tabla 3. 28 Resultados del ciclo evaluado con Cooling Cycle Tester	105
Tabla 3. 29 Temperatura de saturación del refrigerante según la presión de baja. ...	105
Tabla 3. 30 Temperaturas registradas usando Cooling Cycle Tester	106
Tabla 3. 31 Propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema.....	106
Tabla 3. 32 Resultados del ciclo evaluado con Cooling Cycle Tester	107
Tabla 3. 33 Registro de temperaturas según la instrumentación del equipo.....	107
Tabla 3. 34 Propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema.....	108
Tabla 3. 35 Evaluación del sistema usando la propia instrumentación del equipo	108
Tabla 3. 36 Error porcentual en el registro de datos de temperatura	108
Tabla 3. 37 Error porcentual para los diferentes casos realizados	109
Tabla 3. 38 Diferencia de temperatura para los estados 2 y 3 según instrumentación del equipo y CCT.....	110
Tabla 3. 39 Propiedades calculadas para el Equipo Chiller (refrigerante R134a).....	110
Tabla 3. 40 Propiedades calculadas para el Equipo de Refrigeración del laboratorio de termodinámica (Refrigerante R134a).....	111

Tabla 3. 41 Propiedades calculadas para el Equipo Split (Refrigerante R290).....	111
Tabla 3. 42 Resultados de evaluación para el Equipo Chiller	111
Tabla 3. 43 Resultados de evaluación para el Equipo de Refrigeración del laboratorio de termodinámica	111
Tabla 3. 44 Resultados de evaluación para el Equipo Split.....	111
Tabla 3. 45 Error porcentual en los resultados obtenidos con CCT en el Equipo Chiller	112
Tabla 3. 46 Error porcentual en los resultados obtenidos con CCT en el Equipo de Refrigeración	112
Tabla 3. 47 Error porcentual en los resultados obtenidos con CCT en el Equipo Split	112

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se desarrolla un equipo portátil no invasivo para evaluar sistemas de refrigeración convencional. El equipo cuenta con una parte física y una virtual. La parte física del equipo consta de una carcasa protectora, un sistema electrónico con una placa Arduino y seis termopares tipo K, los cuales tienen la ventaja de ser desmontables. La parte virtual es una interfaz gráfica creada mediante programación en Python de nombre Cooling Cycle Tester (CCT). El CCT es un archivo ejecutable que permite obtener propiedades y realizar cálculos termodinámicos del ciclo de refrigeración por compresión de vapor para una variedad de refrigerantes en tiempo real.

El trabajo se fundamenta en principios termodinámicos y aproximaciones válidas, como presiones constantes en los intercambiadores de calor, compresión politrópica, calores de entrada y salida, coeficiente de desempeño, y se realiza una validación experimental. Para el desarrollo de la parte física, se identifican variables e instrumentos que permiten evaluar sistemas de refrigeración de manera no invasiva para el sistema, usando como variable principal la temperatura. Las propiedades de los diferentes refrigerantes son calculadas usando la librería Coolprop mediante programación en el IDE de Python.

Además, la interfaz gráfica creada, de nombre Cooling Cycle Tester (CCT), permite al usuario interactuar con mejoras en el cambio de condiciones de subenfriamiento, recalentamiento y pérdida de energía, haciendo didáctico el programa para evaluar sistemas de refrigeración presentes en el laboratorio de termodinámica.

Finalmente, los resultados obtenidos con el CCT son verificados desarrollando pruebas preliminares y una concluyente a tres equipos de refrigeración. Las pruebas preliminares mostraron una desviación de temperatura entre los 5 y 6 °C en el proceso de condensación, entre las temperaturas registradas por el CCT y la temperatura en los estados de saturación asociada a la presión de los manómetros del propio equipo. Considerando la temperatura asociada a la presión del manómetro como valor referencial de mayor confiabilidad, se ajusta 5 °C las temperaturas del sistema de alta del CCT, reduciendo el error del trabajo de compresión de 25% a 10 % aproximadamente, en todos los casos analizados.

Palabras clave: Evaluación energética, valoración no invasiva, trabajo de compresión, ciclos de refrigeración, equipos para laboratorio, medición de temperatura superficial.

ABSTRACT

In this project, a non-invasive portable equipment is developed to evaluate conventional refrigeration systems. The prototype has a physical part and a virtual part. The physical part of the equipment consists of a protective casing, an electronic system with an Arduino board and six K-type thermocouples, which have the advantage of being removable. The virtual part is a graphical interface created in Python and is called Cooling Cycle Tester (CCT). The CCT is an executable file that allows to obtain refrigerant property values and to perform thermodynamic calculations of the vapor compression refrigeration cycle for a variety of refrigerants in real time.

The work is based on thermodynamic principles and some valid approximations, such as constant pressures in the heat exchangers, the polytropic compression, the first law of thermodynamics, the performance coefficient, and an experimental validation is carried out. For the development of the physical part, some variables and instruments are identified, so that they allow the evaluation of refrigeration systems in a non-invasive way, based on the temperature as the main variable. The properties of different refrigerants are calculated using the Coolprop library programmatically in the Python IDE.

In addition, the graphic interface created, named Cooling Cycle Tester (CCT), allows the user to interact with condition improvements in subcooling, overheating and energy loss, being an academic program to evaluate the refrigeration systems in the thermodynamics laboratory.

Finally, the results obtained with the CCT are verified by developing first a preliminary group of tests on three refrigeration systems and after, a conclusive test over them. The preliminary tests showed a temperature deviation between 5 and 6 °C in the condensation process, between the temperatures recorded by the CCT and the temperature associated with the pressure of the mounted manometers. Considering the temperature associated with the pressure gauge as a trusted reference value, the CCT high system temperatures are adjusted by 5 °C, reducing the compression work error from 25% to approximately 10%, for all cases analyzed.

Keywords: Energy evaluation, non-invasive testing, compression work, refrigeration cycles, laboratory equipment, superficial temperature measurement.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PORTÁTIL NO INVASIVO PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR PARA EL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA DE LA FIM – EPN

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la evaluación energética en el sector urbano y residencial ha tomado importancia como consecuencia del rápido crecimiento demográfico y su impacto directo en el calentamiento global. Estudios recientes de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), establece que dos tercios del consumo de energía primaria mundial está relacionada con el sector urbano, lo que representa el 71 % de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) [1]. Dentro de la energía primaria, los electrodomésticos de mayor consumo energético son los aires acondicionados, bombas de calor y refrigeradores [2]. Dependiendo de las condiciones climáticas, el uso de estos equipos genera beneficios de confort térmico a las personas, y consecuentemente, el tiempo de uso de estos electrodomésticos se ve reflejado económicamente en el consumo energético mensual.

A nivel americano, los procedimientos de evaluación son establecidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). Estas organizaciones son encargadas de evaluar el desempeño mecánico y verificar el rendimiento eléctrico, respectivamente [2].

Para desarrollar los ensayos, existen tres tipos de categorías: nacional, internacional y simplificada internacional [2]. Tradicionalmente, para obtener información de los sistemas de refrigeración, se utilizan sensores de temperatura y presión ubicados en los principales componentes del sistema. Generalmente, el elemento más controlado es el compresor, debido a que es el equipo de mayor consumo eléctrico.

Para monitorear los sistemas de refrigeración, la mayor parte de los instrumentos se adaptan al ciclo de refrigeración, esto interrumpiendo la operación del equipo y cortando las tuberías para que los instrumentos sean instalados entre ellas. Esto es ventajoso, porque los instrumentos llegan a formar parte del sistema cerrado, puesto que realizan mediciones precisas del fluido de trabajo, en un lugar establecido. Sin embargo, la desventaja radica en que se deben realizar modificaciones al sistema para instalar adecuadamente los instrumentos. A esto se suma el conocimiento del sistema que se va a intervenir y los costos asociados con el montaje de los instrumentos.

Por otra parte, con respecto al almacenamiento de información, ciertos dispositivos, como controladores y scanners, recopilan la información durante un tiempo limitado, dando como consecuencia pérdida de información. Además, se añade que el procesamiento de información se lo efectúa de manera manual o mediante hojas de cálculo programables. Este procedimiento incrementa el error en la toma de datos debido a que no se ejecuta un procesamiento de resultados continuo, los cuales son solucionables con la creación de interfaces gráficas o similares.

Basándose en las desventajas encontradas, el desarrollo del proyecto tiene la finalidad de diseñar y construir un prototipo portátil no invasivo para analizar los sistemas de refrigeración, el cual estará conformado por seis sensores de temperatura (resultado de un análisis previo termodinámico y de transferencia de calor). El prototipo contará con una interfaz gráfica que permita observar diagramas del ciclo de refrigeración, propiedades, y características del desempeño del sistema para diferentes refrigerantes.

Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo portátil no invasivo para el análisis de sistemas de refrigeración por compresión de vapor para el laboratorio de termodinámica de la FIM-EPN.

Objetivos específicos

- Recopilar la información bibliográfica del estado del arte con relación a medios de evaluación energética existentes para sistemas de refrigeración y sus respectivas técnicas de aplicación.
- Determinar los parámetros termodinámicos y la instrumentación respectiva para realizar las mediciones necesarias en los sistemas de refrigeración.
- Diseñar un prototipo de medición que permita obtener datos relevantes para diferentes tipos de sistemas de refrigeración sin invadir los mismos.
- Diseñar una interfaz gráfica mediante uso de programación en software libre, que permita procesar los datos recolectados y mostrar resultados del desempeño registrado en ciclo de refrigeración.
- Elaborar planos de diseño del prototipo y la distribución de los componentes dentro del compartimiento.
- Evaluar y validar el prototipo de manera experimental en diferentes equipos de refrigeración.
- Determinar los costos de elaboración del prototipo y de los componentes implementados.
- Elaborar un manual de usuario para el manejo de software implementado y para el manejo adecuado de la instrumentación portable.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Evaluación energética en sistemas de refrigeración

En los últimos años, las evaluaciones energéticas han tomado importancia de estudio debido al crecimiento demográfico y su impacto al calentamiento global. Relacionado con la evaluación energética, se encuentran los sistemas de refrigeración, pues según estudios realizados en el Ecuador, se estima que aproximadamente el 43.2 % del consumo eléctrico mensual en el hogar, está relacionado específicamente al uso de refrigeradores, y este porcentaje se incrementa en lugares tropicales, donde se hace uso de los sistemas de aire acondicionado [8].

La información respecto a la evaluación energética en sistemas de refrigeración está direccionada en la búsqueda de nuevas tecnologías de refrigerantes que permitan sustituir las sustancias CFC y HCFC. Los nuevos refrigerantes deben tener características similares a los sustitutos o mejores, demostrando un mejor rendimiento del ciclo con un bajo consumo eléctrico, además de ser amigables con el ambiente al término de su vida útil.

Estudios relacionados muestran resultados de mejoramiento del coeficiente de desempeño (COP) y la reducción del consumo eléctrico, al implementar nuevos refrigerantes. Generalmente, los experimentos son hechos en refrigeradores debido a que existen normas internacionales que permiten realizar ensayos estandarizados en estos equipos [9].

Ejemplos de la aplicación de las normas, se encuentran en el artículo [10] el cual es un ensayo experimental en el que se reemplaza el refrigerante HFC134a por HFO1234YF en un refrigerador, evaluándolo bajo el estándar UNI – ISO 15502: 2005; aplicable para regiones subtropicales. Como resultado del ensayo se obtuvo una mejora del sistema, reduciendo la capacidad de consumo de energía y aumentando el COP.

El artículo [7] desarrolla un trabajo experimental al sustituir el refrigerante R600a puro, por una mezcla de nano-refrigerante de Óxido de titanio (TiO₂) con refrigerante R600a. El ensayo se realiza acorde al estándar GB/T 8059.1-3-1995 (Estándar Nacional de China) dando como resultado que la mezcla de 0.5 g/L de TiO₂-R600a, reduce un 9.6 % del consumo de energía en el refrigerador.

El artículo [11], realiza un estudio al sustituir el lubricante del refrigerante R600a puro, por una mezcla en diferentes porcentajes de concentración de nanopartículas de grafito implementadas en el lubricante para R600a. Similar al artículo [7], el ensayo se ejecuta de acuerdo al estándar GB/T 8059.1-4, teniendo como resultado que al implementar 0.1 % de nanopartículas de grafito en el lubricante, la energía consumida por el refrigerador se reduce en un 4.55 %, manteniendo estable el sistema.

Finalmente, el artículo [12] desarrolla una evaluación experimental variando las cantidades en peso de refrigerante R134a y las del gas licuado de petróleo (GLP). El método de ensayo se lo realiza acorde a las consideraciones del estándar ISO-8187, teniendo como resultado que, con 60 g de GLP en un tubo capilar de 5 m, el COP del GLP era 7.6 % más alto al COP de 100 g de R134a en un tubo capilar de 4 m; generando un ahorro cerca al 14.3 % del consumo de energía.

Los trabajos ejemplificados son extractos de la cantidad de artículos que se pueden encontrar relacionados con las evaluaciones energéticas en sistemas de refrigeración. La mayor parte de los trabajos, tienen un enfoque beneficioso, pues las propuestas de nuevos refrigerantes mejoran el rendimiento de los sistemas, evidenciando resultados de COP más altos con un bajo consumo de energía. Aparte de que los ensayos son efectuados acorde a normas internacionales, estos deben ser estables y seguros al encontrarse en operación.

1.2. Monitoreo y control de sistemas de refrigeración

El monitoreo y control de sistemas de refrigeración, abarca un procedimiento metodológico para la obtención de datos, mediante el uso de equipos e instrumentación adecuada para cada caso. Dependiendo de la complejidad de los trabajos y la precisión requerida, la instrumentación para monitorear los ciclos de refrigeración también tiene relevancia.

Considerando la complejidad del monitoreo en los sistemas y los criterios considerados para los mismos, estos pueden ir desde un monitoreo básico, hasta un monitoreo avanzado.

Con respecto al control de los sistemas, estos se realizan en equipos de refrigeración convencionales o creados con fines didácticos, donde podemos encontrar instrumentos de presión, temperatura y flujo masico. Para implementar los instrumentos, se realizan modificaciones a las conexiones de tubería y componentes que conforman el ciclo de refrigeración mediante una interrupción de este y la instalación cuidadosa de los instrumentos requeridos para monitorear los equipos.

1.2.1. Monitoreo básico

Un monitoreo básico puede considerarse cuando la información enviada por los instrumentos a dispositivos de almacenamiento es extraída de manera manual. Posteriormente, el análisis termodinámico es realizado mediante hojas de cálculo o similares, ingresando manualmente los datos recolectados. Este monitoreo se diferencia del avanzado, debido a que la utilización de interfases gráficas de usuario (GUI) o similares, no es una limitante para cumplir el objetivo del trabajo.

En el artículo de Taib M.Y. [13] se evidencia la aplicación del monitoreo básico, en el cual para obtener información del ciclo se usan 8 termocuplas tipo T, acopladas a un scanner de temperatura que registra información cada cinco minutos. Hace empleo de cuatro

manómetros ubicados después de cada componente del sistema, en el cual los valores son registrados manualmente cada 5 minutos. Consta también de un medidor de flujo ubicado entre el condensador y el filtro deshidratador, registrando los valores manualmente en el mismo periodo de tiempo para los instrumentos anteriores. El análisis termodinámico se hace en hojas de cálculo de Excel, con su respectiva configuración. La Figura 1. 1 presenta el esquema del artículo experimental desarrollado por Taib M.Y.

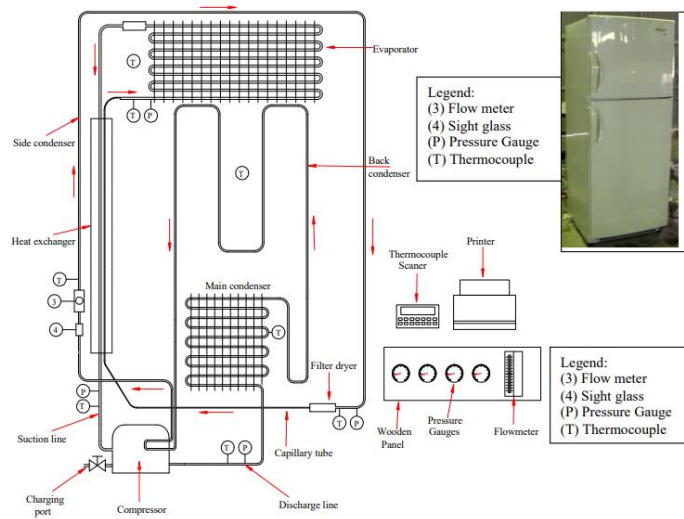


Figura 1. 1 Diagrama esquemático del equipo de prueba y su configuración.

(Fuente: [13])

El monitoreo básico es utilizado ampliamente en bancos de pruebas donde el ciclo de refrigeración es representado físicamente. Artículos como [14] y [15] son trabajos experimentales similares, realizados en bancos de pruebas para ciclos de refrigeración. El banco de pruebas de Coumaressin T. [14] (Figura 1. 2), es utilizado para experimentar la influencia de la mezcla de nanopartículas de óxido de aluminio/óxido de cobre, en reemplazo del refrigerante R134a. Por otra parte, banco de pruebas de Subramani N. [15] (Figura 1. 3), consiste en reemplazar el aceite Polioléster por la mezcla de aceite mineral con nanopartículas de alúmina.

En el monitoreo respectivo de cada caso, se emplean cuatro termocuplas acopladas a un scanner de temperatura y cuatro manómetros de presión ubicados antes y después de cada componente que conforma el sistema. La obtención de datos es registrada de manera manual en ambos casos. Las siguientes figuras representan los bancos de pruebas realizados para cada caso respectivamente.



Figura 1. 2 Banco de refrigeración creado por Coumaressin T.
(Fuente: [14])



Figura 1. 3 Banco de refrigeración creado por Subramani N.
(Fuente: [15])

En definitiva, un monitoreo básico registra información de manera manual o mediante uso de scanner durante limitados periodos de tiempo. Con la información registrada, se efectúan cálculos analíticos aplicando ecuaciones termodinámicas que permitan cumplir los objetivos del experimento. Los cálculos se efectúan de manera manual o programando ecuaciones en hojas de cálculo o similares, los cuales permitan optimizar los cálculos y la organización de estos. Comúnmente el monitoreo básico es aplicado en bancos de pruebas donde la sustitución de refrigerantes; con motivo de la búsqueda de nuevas sustancias, es de manera más sencilla y facilita el desarrollo del trabajo.

1.2.2. Monitoreo avanzado

Un monitoreo avanzado es necesario cuando la cantidad de variables es difícil controlar de forma manual. Entre otros aspectos, los tiempos de pruebas prolongados y la cantidad de datos obtenidos, se añaden a las necesidades de optar por un monitoreo avanzado, en el que no involucre directamente la presencia de personas. Debido a estas necesidades, la

información relacionada con el tema opta por usar monitoreos avanzados implementando sistemas de almacenamiento de datos, como: data logger, microcontroladores o controladores lógicos programables (PLC), los cuales en su mayoría son configurables para almacenar información continuamente, en periodos de tiempo que superan las 24 horas.

Una de las ventajas de utilizar los sistemas de almacenamiento de datos, es la conexión directa con el computador, beneficiando el control y procesamiento de información, pues, con la respectiva programación se obtienen resultados de manera directa en tiempo real. La desventaja está en el conocimiento de programación necesario para asociar entre ellos la instrumentación, los controladores y el computador. Sin embargo, la programación no es una limitante como tal, dado que, con conocimientos básicos de programación, es posible realizar la comunicación controlador-monitor y la configuración de instrumentos para el monitoreo del sistema.

Trabajos como [12], [16], [17], realizan el monitoreo del ciclo de refrigeración utilizando comunicación directa entre data logger y el computador, esto permite registrar la información de manera continua y procesarla según los fines individuales.

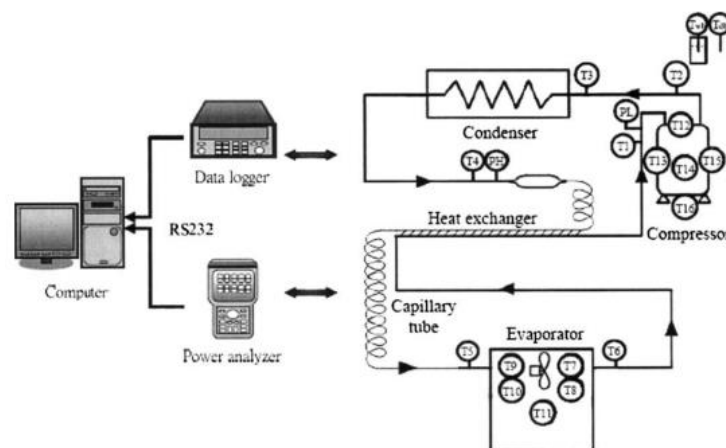


Figura 1. 4 Monitoreo con data logger en un sistema de refrigeración.

(Fuente: [16])

Por otro lado, los artículos [10], [18] prefieren usar microcontroladores para la adquisición de datos, debido a la complejidad de los trabajos y el manejo de información. Ciertos artículos especifican las características del microcontrolador utilizado y la instrumentación respectiva para el mismo.

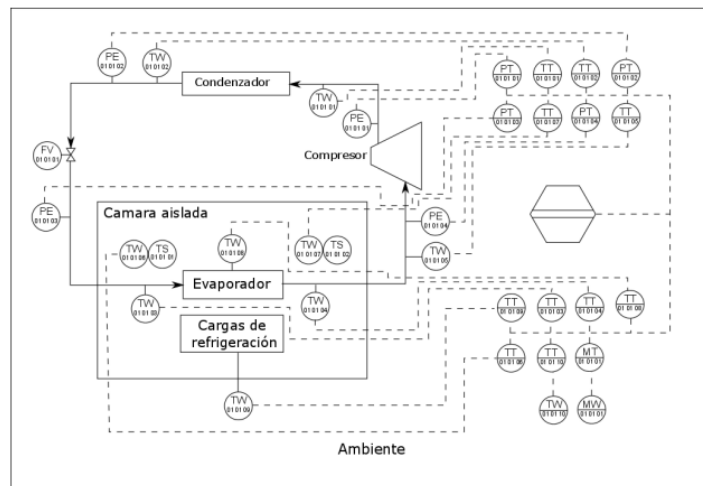


Figura 1. 5 Diagrama P&ID desarrollado para el monitoreo del sistema de refrigeración usando Microcontrolador.

(Fuente: [18])

Finalmente, con relación a los PLC, son pocos los trabajos que emplean estos equipos para almacenamiento de información y procesamiento de datos, debido a que su uso es orientado al campo industrial. Castillo B. [19] en su trabajo de grado, realiza el estudio termodinámico de un sistema de refrigeración no Frost con R600a, evaluando las temperaturas del sistema y para ello utiliza un Compac Río con el respectivo módulo para termocuplas. En cambio, Buenaño L. [20] en su trabajo de grado, realiza la construcción de un sistema de refrigeración para laboratorio, utilizando un PLC para monitorear las variables de presión y temperatura.

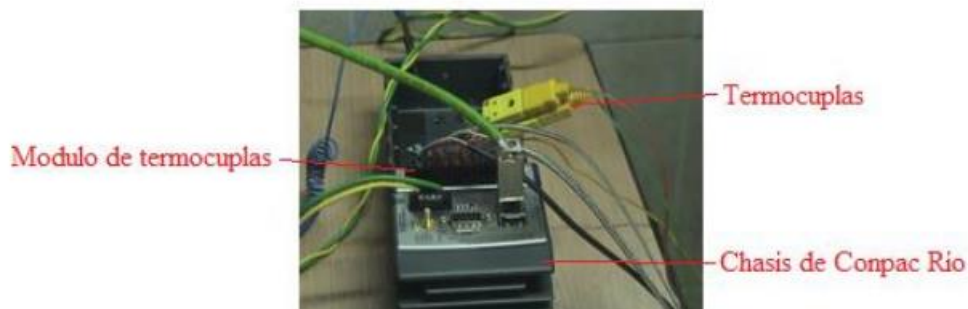


Figura 1. 6 Módulo de termocuplas acoplado al Compac Río

(Fuente: [19])

Según lo descrito, un monitoreo avanzado es útil cuando la recolección de información es de manera continua y durante periodos de tiempos prolongados. Dependiendo de estas necesidades, el controlador debe tener las capacidades necesarias para satisfacer los requerimientos del objetivo del trabajo. Siendo así, se ha pretendido catalogar el monitoreo avanzado dependiendo del controlador utilizado, partiendo desde controladores básicos (Data logger) hasta los de un nivel avanzado (PLC). La categorización también depende

de otros factores que no respectan a esta sección, como son el costo de adquisición, el grado de conocimiento en programación, entre otras.

1.3. Refrigerantes

El refrigerante es una sustancia caracterizada por absorber y expulsar calor en el ciclo de refrigeración [21]. Históricamente, los sistemas de refrigeración, en sus inicios, funcionaban con amoníaco, propano y dióxido de carbono [21] como fluidos de trabajo, sustancias puras que en la actualidad han sido limitadas a ser usadas, debido a su impacto en el calentamiento global, especialmente a la afectación de la capa de ozono.

Esta es la razón por la cual, gran parte de la literatura realiza experimentos de análisis energéticos en los sistemas de refrigeración, dado que su objetivo principal es encontrar un sustituto a los refrigerantes CFC y HCFC, que cumplan o superen las mínimas características y propiedades de estos refrigerantes.

Cabe mencionar que, en la actualidad, hay una variedad de refrigerantes empleados en estos sistemas, y de acuerdo con la Asociación americana de ingenieros de calefacción, refrigeración u aire acondicionado (ASHRAE), han sido clasificados en el estándar ASHRAE 34, según su composición química y grado de seguridad [21]. Por otra parte, en cuanto a su seguridad, la ASHRAE 34 agrupa a los refrigerantes de acuerdo con su toxicidad e inflamabilidad.

	Baja toxicidad (TLV \geq 400 ppm)	Alta Toxicidad (TLV \leq 399 ppm)
Inflamabilidad Alta	A3 R-290 R-600a	B3 Cloruro de Vinilo
Inflamabilidad Media	A2 R-412b R-152a	B2 Amoníaco
Inflamabilidad Baja	A1 R-22 R-134a	B1 R-123

Figura 1. 7 Clasificación de refrigerantes según la ASHRAE 34.

(Fuente: [21])

A nivel nacional, hay refrigerantes comúnmente usados en refrigeradores, congeladores y sistemas de aire acondicionado. Para determinar los refrigerantes más usados, se revisa las especificaciones de los equipos de refrigeración en empresas distribuidoras de estos productos, recolectando la siguiente información:

- Refrigerantes en Refrigeradores: R-600a, R-134a.

- Refrigeradores en Congeladores: R-290, R-600a.
- Refrigerantes en Sistemas de aire acondicionado: R-410A.

La información recolectada de los equipos se ha revisado en los catálogos de empresas como: Indurama, Samsung, LG, Whirlpool, Electrolux. Cabe recalcar que no se hace publicidad de estas empresas, sino que el motivo de mencionarlas es porque el acceso a la información de los productos no es un limitante.

1.3.1. Refrigerante R-600a (Isobutano)

El refrigerante R-600a es una sustancia perteneciente a los hidrocarburos, compuesto químicamente por enlaces de hidrógeno y carbono. Los hidrocarburos se caracterizan porque no destruyen la capa de ozono (ODP), ni afectan al calentamiento global [23]. Esta sustancia, se ha ido implementando gradualmente en los nuevos sistemas de refrigeración debido a su buena eficiencia energética. La ASHRAE 34 lo cataloga al fluido en el grupo A3, esto quiere decir que no es tóxico, pues en caso de fugas debido a que es un fluido inoloro, las personas expuestas a la inhalación de esta sustancia no presentan efectos adversos [23]. Sin embargo, es un gas potencialmente inflamable [21].

Tabla 1.1 Propiedades físicas del refrigerante R600a (Isobutano).

Fórmula	Peso molecular [g/mol]	Temp. de ebullición [°C]	Temp. crítica [°C]	Presión crítica [bar.abs]	ODP	GWP
C_4H_{10}	58.1	-11.7	135	36.45	0	3

(Fuente: [24])

1.3.2. Refrigerante R-134a (Tetrafluoroetano)

El refrigerante R-134a, es una sustancia que pertenece a los hidrofluorocarbonados (HFC), estos están compuestos químicamente por moléculas de hidrógeno, flúor y carbono. Ambientalmente, no son destructores de la capa de ozono, pero si son aportantes a los gases de efecto invernadero (GEI). El refrigerante comúnmente se lo utiliza en refrigeradores domésticos, y sistemas de aire acondicionado en automóviles [25]. Según la ASHRAE 34, el refrigerante está en el grupo A1, esto quiere decir que no es tóxico para las personas, ni inflamable [22].

Tabla 1.2 Propiedades físicas del refrigerante R-134a (Tetrafluoroetano).

Fórmula	Peso molecular [g/mol]	Temp. de ebullición [°C]	Temp. crítica [°C]	Presión crítica [bar.abs]	ODP	GWP
CH_2FCF_3	102	-26.1	101.1	40.67	0	1430

(Fuente: [25])

1.3.3. Refrigerante R-290 (Propano)

El R-290 o propano, es un fluido natural perteneciente a los refrigerantes hidrocarburos, amigable con el ambiente y sin efectos contradictorios en la emisión de gases. De acuerdo a la revista publicada por TECUMSEH [26], se demuestra experimentalmente que el propano, como refrigerante natural, presenta mejores beneficios al consumo energético de los ciclos de refrigeración, considerando que supera las características térmicas de los refrigerantes R404a y R134a [26]. Pese a la superioridad que tiene sobre los refrigerantes R404a y R134a, su desventaja radica en que es un fluido inflamable, sin efectos tóxicos, ubicándose en el grupo A3 según la clasificación de la ASHRAE 34 [22].

Tabla 1.3 Propiedades físicas del refrigerante R290 (Propano).

Fórmula	Peso molecular [g/mol]	Temp. de ebullición [°C]	Temp. crítica [°C]	Presión crítica [bar.abs]	ODP	GWP
C_3H_8	44.1	-42.1	96.7	42.48	0	3

(Fuente: [26])

1.4. Instrumentación en equipos

1.4.1. Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura son elementos que transforman el valor de la magnitud física (Temperatura) en una señal eléctrica. A diferencia de otros fenómenos físicos (presión, flujo másico, etc.), en los que el instrumento debe estar en contacto directo con el fluido de trabajo, el sensor de temperatura no necesariamente requiere cumplir esta condición [27]. Por ende, se puede encontrar sensores de temperatura destinados a medir temperaturas superficiales en diferentes objetos.

En la literatura existen diferentes instrumentos de medición de temperatura, los cuales su selección dependerá de diferentes factores, entre los más principales la precisión y el rango de medición de temperatura.

TERMOPARES

Los termopares o también conocidos como termocuplas, son instrumentos de medición de temperatura formados por dos metales conductores diferentes o aleaciones, unidos en sus extremos. El principio de funcionamiento es basándose en el Efecto Seebeck, donde la diferencia de temperatura en la unión de los dos metales produce una diferencia de potencial eléctrico [28].

Dentro de este marco, la cantidad de termocuplas que se pueden encontrar son ilimitadas. Esto ha hecho que compañías como ANSI y IEC codifiquen los termopares según sus materiales que lo conforman y su rango de temperatura, identificándose mediante colores y letras.

CÓDIGO ANSI	COMBINACIÓN DE ALEACIONES CONDUCTOR		CONDUCTOR MAGNETICO	MÁXIMO RANGO DE TEMPERATURA UTILIZADO	CÓDIGOS DE COLOR GRADO	
	(+)	(-)			TERMOPAR	EXTENSIÓN
J	Hierro Fe	Constantan Cu - Ni	Hierro (+)	-32 a 1382 °F 0 a 450° C Grado Termopar 32 a 392 °F 0 a 200 °C Grado Extensión	+ BLANCO - ROJO	+ BLANCO - ROJO
K	Cromel Ni - Cr	Alumel Ni - Al	Alumel (+)	-328 a 2282 °F -200 a 1250° C Grado Termopar 32 a 59 °F 0 a 260 °C Grado Extensión	+ AMARILLO - ROJO	+ AMARILLO - ROJO
T	Cobre Cu	Constantan Cu - Ni	Ninguno	-328 a 628 °F -200 a 350° C Grado Termopar -78 a 212 °F -60 a 100 °C Grado Extensión	+ AZUL - ROJO	+ AZUL - ROJO
E	Cromel Ni - Cr	Constantan Cu - Ni	Ninguno	-328 a 1650 °F -200 a 900° C Grado Termopar 32 a 392 °F 0 a 200 °C Grado Extensión	+ MORADO - ROJO	+ MORADO - ROJO
N	Nicrosil Ni - Cr - Si	Nisil Ni - Cr - Mg	Ninguno	-150 a 2642 °F -270 a 1500° C Grado Termopar 32 a 392 °F 0 a 200 °C Grado Extensión	+ NARANJA - ROJO	+ NARANJA - ROJO
R	Platino - 13% Rhodio Pt - 13% Rh	Platino Pt	Ninguno	32 a 2642 °F 0 a 1450° C Grado Termopar 32 a 300 °F 0 a 150 °C Grado Extensión	+ NEGRO - ROJO	+ NEGRO - ROJO

Figura 1. 8 Clasificación e identificación de termopares según ANSI/MC96.1

(Fuente: [28])

Acerca del tipo de termopares utilizados en los sistemas de refrigeración según la literatura, se pueden nombrar termopares tipo J [19], [29], tipo K [30] y tipo T [4]. Como se observa en la Figura 1. 8, estos se diferencian por su color, el material que están conformados, y el respectivo rango de temperatura. Además, existen otras características que son importantes recalcar en cada uno de estos instrumentos.

Tabla 1.4 Características y aplicaciones de termopares tipo J, tipo K, y tipo T.

Termopar	Límite de error (Grado estándar)	Aplicaciones	No recomendado
Tipo J	2.2 °C o 0.75 %	Atmósferas de vacío, reducción e inertes	Atmósferas oxidantes o Atmósferas menores a los 0 °C
Tipo K	2.2 °C o 0.75 % en 0 °C 2.2 °C o 2.0 % bajo 0 °C	Ambientes oxidantes e inertes Confiable y preciso para medir altas temperaturas Atmósferas menores a los 0 °C	Ambientes de vacío o reductores.
Tipo T	1.0 °C o 0.75 % en 0 °C 1.0 °C o 1.5 % bajo 0 °C	Ideales para Atmósferas bajo los 0 °C Ambientes oxidantes, reductoras o de gas inerte	Ambientes de altas temperaturas

(Fuente: Propia)

Termómetros de resistencia

El termómetro de resistencia o detector de resistencia de temperatura (RTD), es un instrumento de medición del tipo transductor, donde la variación de temperatura en el material produce una resistencia eléctrica proporcional al mismo [31]. Acerca de estos instrumentos, el más conocido y usado en la industria es el Pt100. Este instrumento está conformado a base de platino por sus características que lo hacen predominante a otros materiales:

- Tiene alta linealidad en la relación temperatura-resistencia
- Es aplicable en ambientes oxidantes a altas temperaturas
- El punto de fusión es elevado (1768 °C)
- La obtención del material tiene un alto grado de pureza

Según la calidad del platino, estos pueden ser RTD de platino patrón normado según la Escala Internacional de Temperatura (ITS-90) o RTD de platino industrial. Ambos comparten características similares, pero las aplicaciones son diferentes [31].

Tabla 1.5 Tipos de termómetros de resistencia de platino

Material	Tipo de Termómetro	Geometría	Alcance de Uso [°C]
Platino	Patrón	Cápsula	-259 a 232
		Tallo largo	-200 a 660
		Alta temperatura	600 a 962
	Industrial	Cualquier forma	-200 a 850

(Fuente: [31])

Ahora bien, la literatura referente al uso de sensores RTD en los ciclos de refrigeración, ubican a los instrumentos en los compartimentos internos del refrigerador, los cuales son: el congelador y el compartimento de comida fresca [5], [7]. Además, otros sensores son ubicados en el sistema externo del refrigerador (Compresor, condensador y tubo capilar). Una de las particularidades de este montaje es que el instrumento debe acoplarse al sistema mediante algún tipo de conexión que permita fijar al instrumento y obtener la información del sistema. Un ejemplo de conexión se presenta en la Figura 1. 9.



Figura 1. 9 Instalación y montaje de termoresistores externos

(Fuente: [18])

Termómetros digitales industriales

Los termómetros digitales industriales son instrumentos más desarrollados a comparación de los termopares y los RTD. Su principal diferencia está en que este instrumento puede ser configurable para almacenar información en determinados periodos de tiempo, además de mostrar los resultados en una pantalla digital [32]. Para medir tienen acoplado una sonda de temperatura (Termistor) que, mediante el soporte de montaje suministrado por el fabricante, este puede ubicarse en los lugares para medición [32].



Figura 1. 10 Termómetro digital con sonda
(Fuente: [32])

Sensores de temperatura digitales

Son instrumentos de un grado avanzado conformados por un sistema electrónico donde el controlador es un componente principal del sistema, ya que permite recibir y registrar los datos de temperatura. El sensor está recubierto por una cápsula de acero inoxidable, redondeada en el fondo y con una funda de silicona, esto proporcionada al elemento ser más rígido y protegerse de efectos de radiación presentes en la atmósfera [33]. Existen diferentes sensores de temperatura digital para diferentes aplicaciones, y con relación a los ciclos de refrigeración, la literatura nombra dos tipos de instrumentos, el DS18B20 [6] y SB19 [34].

1.4.2. Dispositivos de control y almacenamiento de información

Estos equipos son desarrollados para registrar y almacenar información obtenida de sistemas físicos. Dependiendo de la señal enviada por los instrumentos complementarios, la información puede recibirse de manera analógica o digital. Además, estos equipos son fabricados para controlar una variable física, o múltiples variables, lo que conlleva a que exista variedad de equipos para diferentes actividades.

Registrador de datos (Data logger)

El Data logger es un dispositivo electrónico destinado al registro y almacenamiento de información, configurable para trabajar en periodos de tiempo prolongados, registrando los datos continuamente [35]. Las características del dispositivo pueden variar dependiendo

de los propósitos en particular. Además, pueden tener comunicación directa con un ordenador para poder registrar, almacenar y procesar los datos posteriormente [35]. Su implementación es muy notoria debido a que es un dispositivo económico y de menor tamaño. En la literatura, los data logger se han usado para recolectar datos de temperatura en tiempos que van desde cuatro horas [12] hasta las 24 horas [4] [17].



Figura 1. 11 Ejemplo de recolector de datos HP data logger
(Fuente: [17])

Microcontroladores (Arduino)

Los microcontroladores son dispositivos electrónicos que conforman el sistema de adquisición de datos (DAS). En el monitoreo de sistemas de refrigeración, la literatura menciona que el microcontrolador comúnmente usado es el Arduino [6], [10], [18].

Arduino como tal es una plataforma de acceso libre en hardware y software, esto quiere decir que es legal replicar las placas creadas oficialmente por la plataforma y que el software es accesible para su programación [36]. Dentro de este ámbito, se pueden encontrar hasta 24 tipos de placas Arduino para ser utilizadas como microcontroladores, diferenciándose una con otras, por la cantidad de entradas analógicas y digitales que pueden conformar.

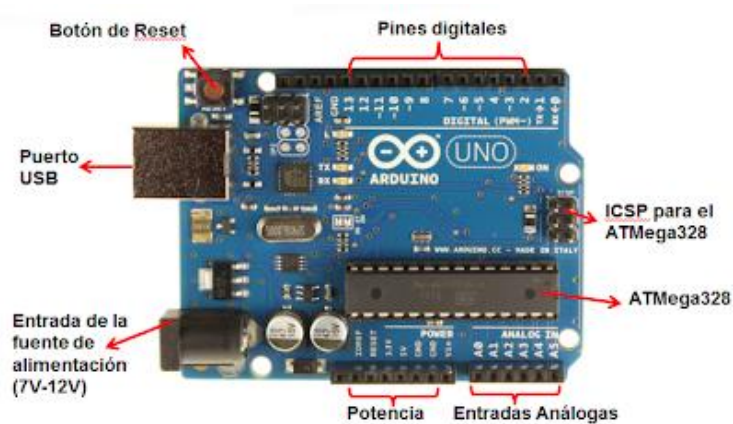


Figura 1. 12 Esquema de una placa Arduino UNO.
(Figura: [36])

Controlador lógico programable (PLC)

El controlador lógico programable (PLC) es un dispositivo electrónico programable que efectúa automáticamente acciones según instrucciones procesadas de múltiples señales de entrada. El PLC es aplicable en el ámbito industrial donde los procesos requieren una respuesta rápida para tomar decisiones o realizar acciones [37]. Son compactos y de gran capacidad de almacenamiento, lo cual les hace versátiles para cumplir cualquier actividad programada a nivel industrial, sin embargo, son dispositivos que superan los 150 dólares.

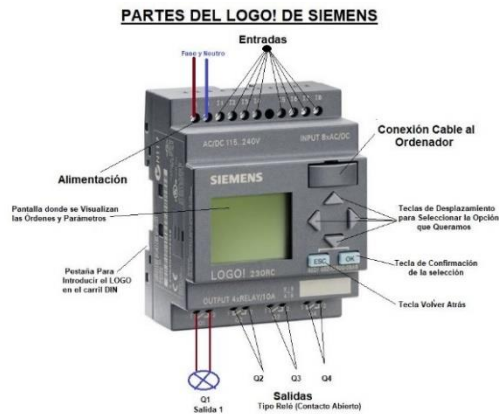


Figura 1. 13 Esquema de partes de un PLC marca Logo de SIEMENS
(Fuente: [37])

Otros controladores industriales

La literatura con relación a las evaluaciones energéticas en los sistemas de refrigeración, existen otros controladores industriales que se han implementado para estos propósitos. Por ejemplificar dos controladores encontrados son el Módulo multiplexor [30] y el Controlador Compac Río [19], cada uno de estos controladores para la lectura de datos de temperaturas y presiones, deben contar con su módulo asociado para cada variable, lo cual físicamente requieren de espacios más grandes y específicos para instalarse.

1.5. Programación y uso de interfaces gráficas en refrigeración

La programación orientada al control de sistemas de refrigeración se ha implementado para mejorar el manejo de información y procesamiento de esta. Sea que la información esté obtenida de un control básico, o de un control avanzado, el desarrollo y cálculo de resultados provenientes de esta información, requieren de programación.

La programación de cálculos aritméticos permite obtener resultados en menor tiempo con el simple hecho de ingresar valores de entrada. Esto también se logra automáticamente al leer datos obtenidos de un sistema controlado, los cuales son procesados continuamente, mostrando resultados en tiempo real. Los resultados pueden plasmarse en interfaces gráficas de usuario (GUI), las cuales permiten ser interactivas y didácticas para las personas, permitiendo un mejor entendimiento del proceso o cálculo realizado.

1.5.1. Programación en controladores

En los microcontroladores y controladores, dependiendo de la marca del dispositivo a utilizar, se tiene asociado un IDE para la respectiva programación. Un ejemplo es Arduino, el cual de su plataforma se puede descargar e instalar el software libre Arduino.exe, permitiendo la programación para cualquier microcontrolador de esta marca basado en el lenguaje C++[38].

Por otra parte, los PLC tienen dos tipos de lenguajes de programación, escritos y visuales. Según la IEC 61131-3, estos tipos de lenguajes pueden ser: Lista de instrucciones (STL), texto estructurado (ST), diagramas tipo escalera (LADDER), diagrama de bloques de funciones (FBD), y diagrama de funciones secuenciales (SFC) [39]. Ejemplo de software dedicados a esta programación es RSLogix 5000, el cual se dedica a la programación LADDER para controladores Logix. Simatic es un software de programación de lenguaje FBD para programación de PLC Siemens.

1.5.2. Programación de interfaces gráficas de usuario

La programación de interfaces gráficas de usuario ha permitido a las personas satisfacer necesidades de diferentes aplicaciones. Según la literatura, crear una interfaz gráfica va más allá de programar y mostrar resultados correctos en una pantalla estética, si no de la usabilidad de esta para el usuario [40]. Dentro de las características para que una GUI sea usable debe cumplir lo siguiente:

- Satisfacción. - Cómoda y entendible para el usuario
- Efectiva. - Cumpla su objetivo para la cual se diseñó
- Eficiente. - Cumple tareas sin errores, en un menor tiempo

Estos hacen que la interacción persona – computadora, sea beneficiosa, teniendo en cuenta que, en el marco del diseño y programación de cualquier GUI, la voz del usuario es de vital importancia para el grupo de programadores [40].

Debe señalarse que, para los sistemas de evaluación energética existen diversas GUI relacionadas con el tema, que tienen diferentes objetivos. Sin embargo, muchas de estas tienen semejanzas en cuanto al lenguaje de programación en el que se desarrolló la interfaz. Un lenguaje de programación es el de LabVIEW, el cual cuenta con un lenguaje de programación SCADA [18]. El lenguaje SCADA (Sistema de supervisión, control y adquisición de datos) es aplicable en sistemas de control industriales, pues este programa permite recibir información y controlar diferentes sensores, mediante la programación y uso de una interfaz gráfica que favorece la interacción persona-computador.

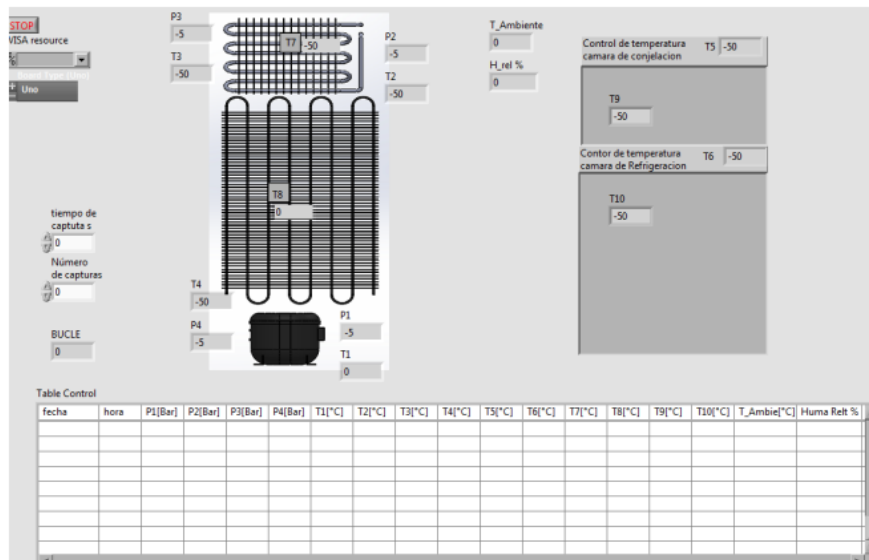


Figura 1. 14 Interfaz gráfica de captura de datos de un ciclo de refrigeración creada mediante programación en LabVIEW.

(Fuente: [18])

Otro lenguaje para la creación de GUI es la programación en Visual Basic [41]. Actualmente, para la programación en este lenguaje existe la plataforma de Microsoft Visual Studio, la cual no se limita a la programación solo en lenguaje de Visual Basic, sino también puede programar en lenguaje Network, C++, entre otros.

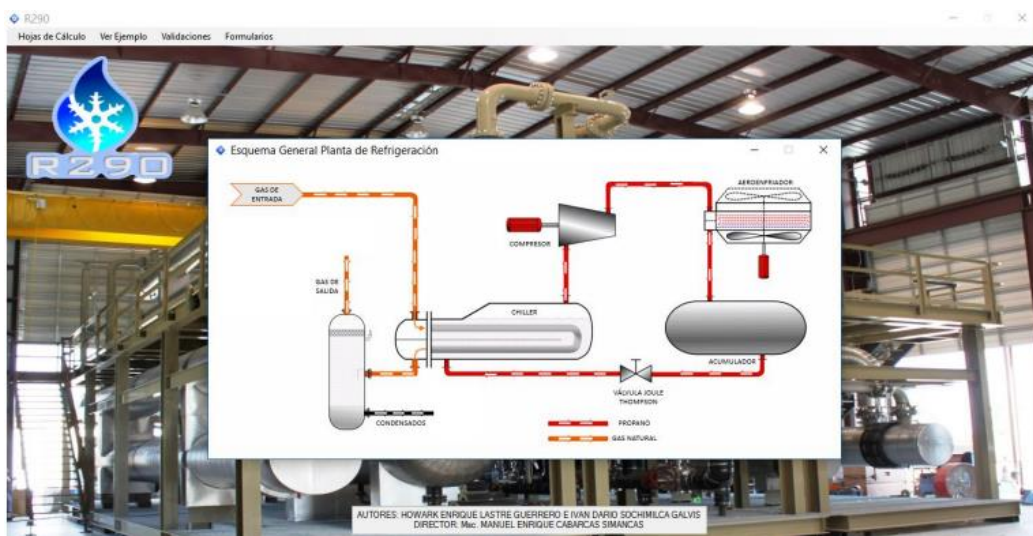


Figura 1. 15 Software R290 para el diseño de plantas de refrigeración generado mediante Visual Basic.

(Fuente: [41])

Un software para la programación de GUI es MATLAB [42]. Según la literatura, el programa es comúnmente usado para producir aplicaciones de aprendizaje debido a su facilidad para crear la misma, y fácil programación [42].

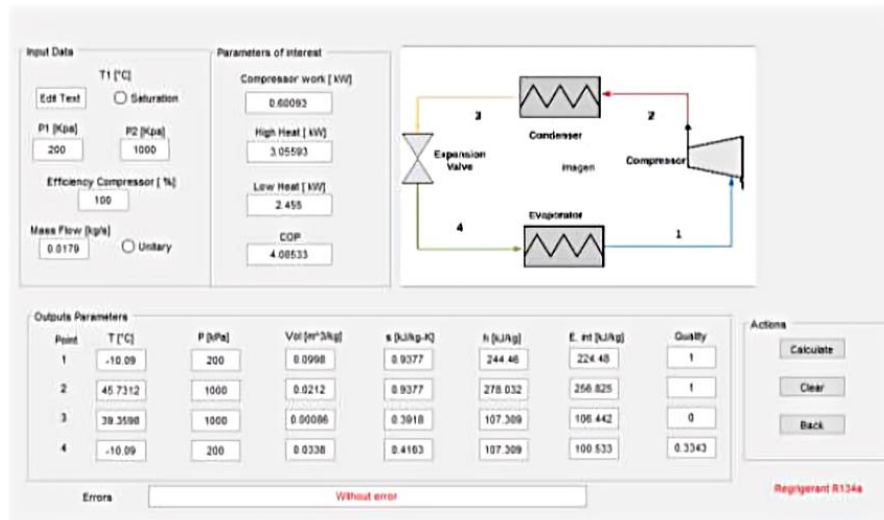


Figura 1. 16 RefriTerm para ciclos de refrigeración creada con MATLAB
(Fuente: [42])

Otro lenguaje comúnmente utilizado es el lenguaje de Python. Python tiene la ventaja de ser un software libre, por lo que, al crear GUI ejecutables, estas puedan distribuirse e instalarse en diferentes dispositivos sin restricciones. Además, incluye gran cantidad de librerías desarrolladas específicamente para temas relacionados con la termodinámica [43]. Con relación a las librerías, para aplicaciones termodinámicas, Coolprop es una librería de Python, la cual permite desarrollar cálculos termodinámicos a partir de dos propiedades independientes definidas, similar al proceso que se hace manualmente [44]. La librería cuenta con varios fluidos puros y pseudo puros, utilizados en diferentes campos industriales. Su capacidad de desarrollar gráficas Ph y Ts, a partir de resultados obtenidos, lo hace versátil e intuitiva para el tema de estudio [44].

Coolprop no se limita a programarse solo en Python, sino también puede programarse en diferentes lenguajes como los previamente comentados, Visual Studio, MATLAB, C++, entre otros.

```

import CoolProp
from CoolProp.Plots import PropertyPlot
from CoolProp.Plots import SimpleCompressionCycle
pp = PropertyPlot('HEOS::R134a', 'PH', unit_system='EUR')
pp.calc_isolines(CoolProp.iQ, num=11)
cycle = SimpleCompressionCycle('HEOS::R134a', 'PH', unit_system='EUR')
T0 = 280
pp.state.update(CoolProp.QT_INPUTS, 0, 0, T0-10)
p0 = pp.state.keyed_output(CoolProp.iP)
T2 = 310
pp.state.update(CoolProp.QT_INPUTS, 1, 0, T2+15)
p2 = pp.state.keyed_output(CoolProp.iP)
pp.calc_isolines(CoolProp.iT, [T0-273.15, T2-273.15], num=2)
cycle.simple_solve(T0, p0, T2, p2, 0.7, SI=True)
cycle.steps = 50
sc = cycle.get_state_changes()
pp.draw_process(sc)
import matplotlib.pyplot as plt
plt.close(cycle.figure)
pp.show()

```

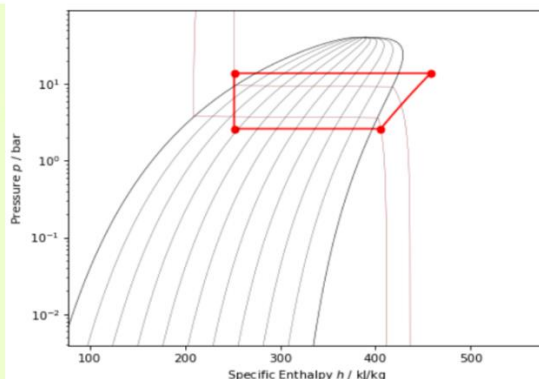


Figura 1. 17 Ejemplo de programación en Python utilizando la librería Coolprop
(Fuente: [70])

Existe también un software dedicado solo para aplicaciones termodinámicas, el Engineering Equation Solver (EES). Este software es muy aplicable en los campos de ingeniería [19], [30], pues a partir de una programación básica, se puede obtener gráficas similares a las presentadas en la Figura 1. 17 del Coolprop.

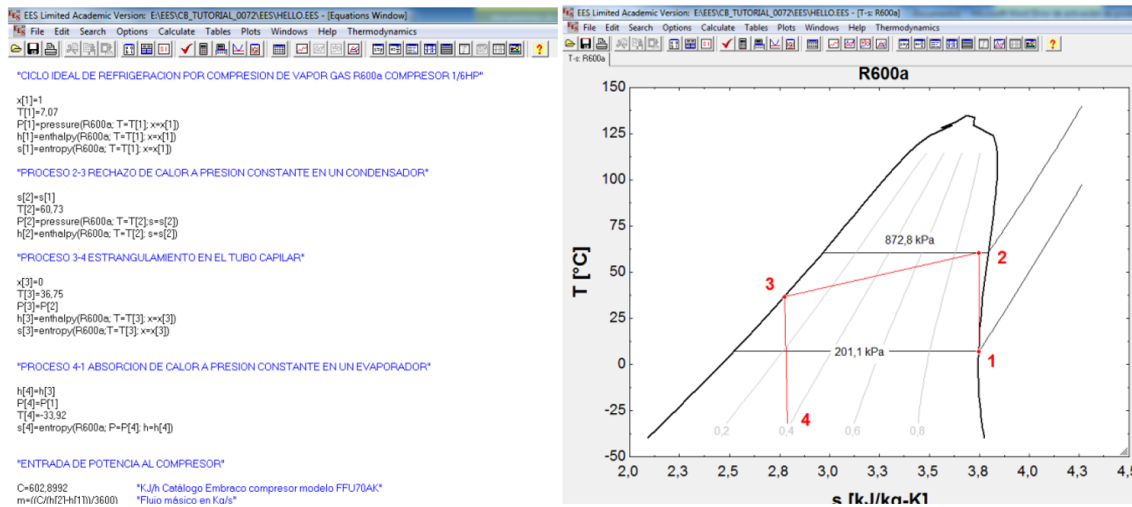


Figura 1. 18 Ejemplo de programación en EES para ciclos termodinámicos.

(Fuente: [19])

La desventaja del software EES, es que, para el desarrollo de los cálculos, los datos de entrada deben ingresarse manualmente. No obstante, los resultados son altamente confiables e instantáneos para casos de estudio, según la literatura.

2. METODOLOGÍA

Con la finalidad de cumplir los objetivos planteados para el desarrollo del trabajo, se plantea una metodología teórica-experimental modulada en 5 etapas (Figura 2. 1). A manera de resumen, se describe brevemente el contenido de cada etapa.

Etapa 1: Definición de parámetros

Basándose en trabajos y artículos de referencia para el desarrollo del marco teórico, la definición de parámetros abarca:

- Variables físicas e importantes por controlar.
- Puntos o lugares estratégicos del sistema para monitorear las variables físicas.
- Ecuaciones termodinámicas necesarias para evaluar los sistemas de refrigeración
- Diagramas termodinámicos relevantes para representar el proceso de refrigeración.

Como resultado final de la etapa, se obtiene la cantidad de variables físicas a monitorear y la respectiva ubicación dentro del sistema. Se definen las ecuaciones termodinámicas fundamentales que permiten evaluar los ciclos de refrigeración y además los diagramas termodinámicos más representativos con los punto selectos de donde se está obteniendo la información del sistema. Cabe destacar que para definir cada uno de estos parámetros, se toma en consideración criterios termodinámicos, referencias y se realizan pruebas experimentales simplificando el desarrollo del proyecto.

Etapa 2: Selección de instrumentos

La etapa tiene como objetivo final definir la instrumentación apropiada para medir y procesar la información extraída del ciclo de refrigeración. Inicialmente, se parte con la búsqueda de opciones de instrumentos para las variables definidas recurriendo catálogos y trabajos experimentales relacionados con el proyecto. La instrumentación no debe ser invasiva para el sistema, cumpliendo el objetivo principal del proyecto y simplificando la cantidad de opciones de instrumentos. Los instrumentos más convenientes se enlistan y mediante el método de “Residuos ponderados” propuesto por Carles Riba, se determina la instrumentación final a utilizar en el equipo de medición.

Etapa 3: Selección de lenguaje y desarrollo del software

En la etapa 3, la selección del software de programación tiene como criterios de selección:

- El lenguaje de programación.- Parámetro necesario relacionado a la facilidad de obtener el setup del software programador, como de igual manera el acceso a la información.

- Compatibilidad con el microcontrolador.- Refiriéndose a la programación para transferir información entre el IDE de programación y el microcontrolador.
- Manejo de la biblioteca Coolprop.- Esta es una biblioteca que calcula propiedades termodinámicas de diferentes fluidos mediante una sencilla programación.
- Manejo de bibliotecas o complementos para la generación de interfaces gráficas (GUI), y la creación de programas ejecutables.

En la etapa 3, al vincular el controlador con el software de programación, se procede a extraer los datos medidos mediante el uso de los sensores de temperaturas y, por consiguiente, se desarrolla una programación básica de prueba y error. La finalidad de realizar la programación básica es observar secuencias, procesos y codificación de variables que permitan simplificar la programación final del proyecto. A su vez, se procede a realizar la respectiva programación de la interfaz gráfica, considerando dentro de ella, la mejor distribución de la información y el fácil entendimiento de esta. El resultado de la etapa es obtener un archivo ejecutable asociado a la medición de temperaturas y obtención de resultados termodinámicos en tiempo real.

Etapa 4: Diseño del equipo de medición

En la etapa 4, para el diseño del prototipo se toma en consideración los componentes electrónicos necesarios para llevar a cabo las primeras pruebas y posteriormente las pruebas finales. Con esto, en primera instancia, se procede a medir la geometría de todos los componentes y representarlos espacialmente en un programa CAD 3D como SolidWorks o Inventor. Dentro del programa de diseño, se distribuye los componentes y se presenta la mejor opción del prototipo en el escrito y su geometría para enviarse a construir con ayuda de impresión 3D.

Etapa 5: Construcción y pruebas definitivas

La construcción del equipo, según el modelado 3D en el programa de diseño consta de 3 componentes principales:

- Cuerpo o estuche de la placa electrónica
- Placa electrónica impresa en cobre y soldada sobre el Arduino.
- Acoples hembra para termopar

Las medidas generales del equipo final son de 170x175 mm en ancho y largo, respectivamente. Con el equipo finalizado se realizan pruebas en equipos instrumentados de laboratorios de la ESFOT Y FIM, para determinar la confiabilidad del equipo según un error porcentual.

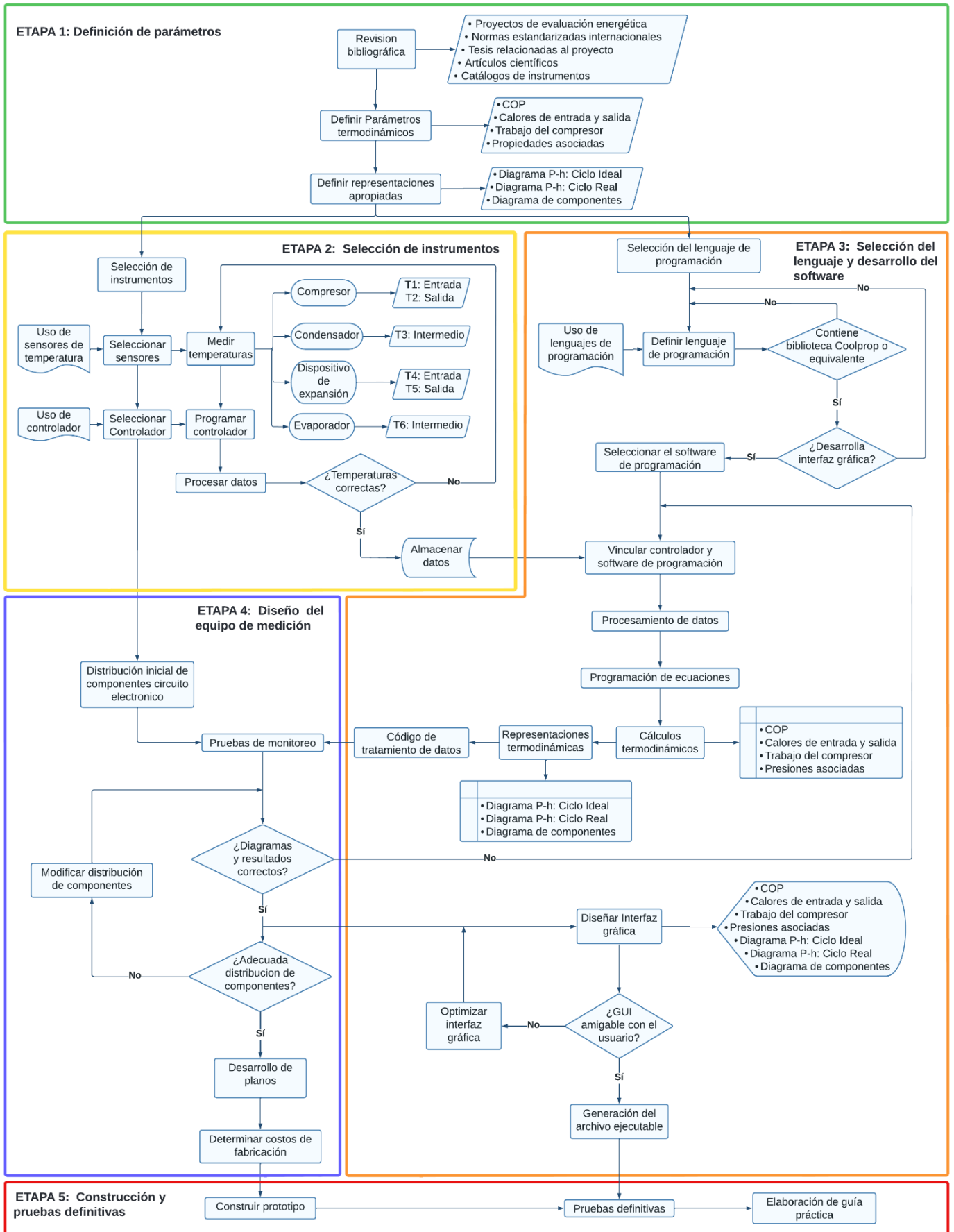


Figura 2. 1 Procedimiento metodológico para el desarrollo del trabajo experimental

(Fuente: Propia)

2.1. Definición de parámetros

Según el postulado de estado, para especificar el estado de un sistema simple, se requiere de dos propiedades intensivas independientes, dentro del ciclo [45]. Bajo este criterio, un ciclo termodinámico ideal está prácticamente definido, al especificar dos propiedades intensivas en dos de los cuatro estados (1-4) establecidos en la Figura 2. 2.

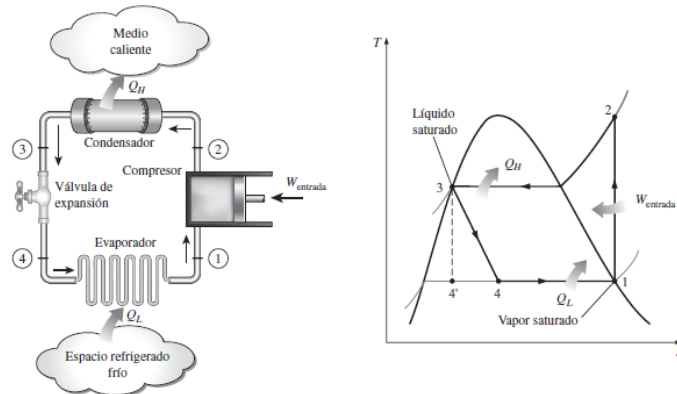


Figura 2. 2 Ciclo ideal de refrigeración

(Fuente: [45])

Un ciclo ideal es difícil de obtener por causa de las irreversibilidades del sistema (caídas de presión por la fricción del fluido y la transferencia de calor con los alrededores), consecuentemente se produce un ciclo real de refrigeración, el cual no se desvía en su totalidad del ciclo ideal.

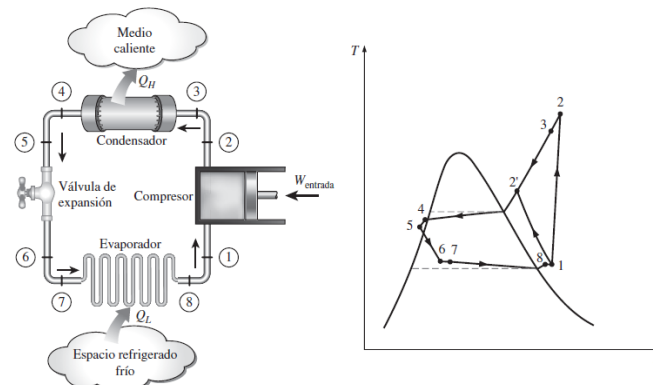


Figura 2. 3 Ciclo real de refrigeración

(Fuente: [45])

El diagrama de componentes de la Figura 2. 3, define un ciclo real con ocho estados, localizados al ingreso y salida de los cuatro componentes principales. Según la literatura, para los ensayos de evaluación energética, no necesariamente se requieren de los ocho estados. Algunos se descartan del análisis debido a su irrelevancia para el sistema.

Para descartar los estados irrelevantes, es necesario realizar un análisis del ciclo real para determinar qué puntos o estados del sistema no son importantes en el estudio:

- Estado 1 al 2 o 1 al 2'. - Proceso en el que el compresor realiza trabajo para elevar la presión del refrigerante, de la salida del evaporador a la del condensador. Del estado 1 al 2, se realiza una compresión adiabática en la cual se entrega energía al refrigerante, aumentando su temperatura y presión. Del estado 1 al 2' los compresores no son adiabáticos y son enfriados mecánicamente mediante arreglos del fabricante o por la misma temperatura del ambiente.
- Estado 2 al 3.- Según estudios, las irreversibilidades presentes en esta sección son insignificativas para el proceso.
- Estado 2 al 4.- El proceso de condensación, según estudios experimentales [29], atestiguan que la presión de condensación tiende a mantenerse constante cuando las variaciones en la temperatura ambiente no son altamente variantes. Bajo esta afirmación, se considera que el estado 2 y 4, trabajan a una misma presión, semejante al ciclo ideal.
- Estado 4 al 5.- Proceso de subenfriamiento del refrigerante en el que se produce una caída de temperatura entre 10 °F y 15 °F (-12 °C a -9 °C aprox.) a la salida del condensador [21].
- Estado 5 al 6.- Corresponde al paso del fluido por el dispositivo de expansión. Estos dispositivos tienen relación directa con la eficiencia del ciclo, ya que, dependiendo de la adecuada selección y calibración, estos afectan directamente al desempeño del evaporador [21].
- Estado 6 al 7.- En este tramo la caída de presión es mínima debido a que el dispositivo de expansión y el evaporador se encuentran muy cerca entre ellos [45].
- Estado 7 al 8.- Proceso en el que el refrigerante, al encontrarse en estado líquido - gaseoso en el evaporador, pasa a ser gas saturado manteniéndose a una presión constante. Experimentalmente, se ha determinado que las pérdidas energéticas por el evaporador son alrededor del 9 %, considerándoles no relevantes para el proceso [29].
- Estado 8 al 1.- Proceso de sobrecalentamiento. Este proceso consiste en aumentar la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador, entre 3 °C y 7 °C [21], con el fin de asegurar que el refrigerante esté totalmente evaporado antes de ingresar al compresor.

Según el previo análisis, hay estados del ciclo real que no tienen relevancia para el sistema, y según la literatura, las presiones de alta y baja se pueden considerar constantes. Estas simplificaciones permiten esquematizar un nuevo diagrama real del ciclo de refrigeración diferente al de la Figura 2. 3.

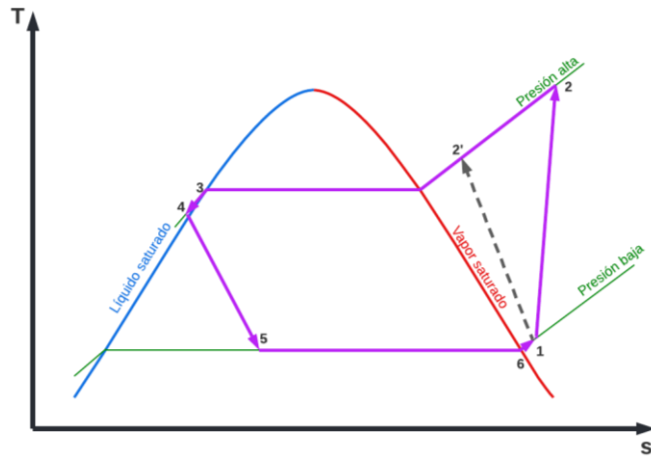


Figura 2. 4 Diagrama T-s simplificado según los puntos importantes del sistema.

(Fuente: Propia)

El diagrama T-s se simplifica a seis estados fundamentales, tomando en cuenta el subenfriamiento a la salida del condensador y el sobrecalentamiento a la salida del evaporador.

2.2. Ubicación de instrumentos según referencias bibliográficas

La mayoría de los trabajos donde se evalúan los ciclos de refrigeración, están desarrollados de manera experimental, los cuales parten identificando la cantidad de puntos de lectura relevantes para alcanzar el objetivo de los diferentes trabajos. Posteriormente, se identifica la variable física que se desea obtener o controlar mediante el uso de su respectivo instrumento de medición y finalmente se definen los parámetros termodinámicos que se desean calcular con los datos obtenidos.

Según el artículo [10], para realizar una investigación experimental en sustitución del HFC134a con HFO1234YF, se emplean cinco sensores PT100 en la entrada y salida de cada componente, además, dos manómetros de presión en la entrada y salida del compresor. La Figura 2. 5, muestra un esquema de la ubicación de los instrumentos en el sistema.

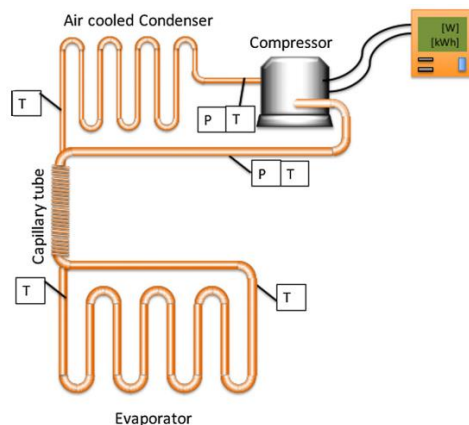


Figura 2. 5 Esquema del circuito de refrigeración

(Fuente: [10])

Por otra parte, según el manual [21], para la toma de datos en un sistema de refrigeración o aire acondicionado, se deben medir las siguientes variables:

- Temperatura de descarga del compresor leído a 5" de la válvula de servicio
- Temperatura y presión a la salida del condensador
- Temperatura y presión a la salida del evaporador
- Temperatura en la succión del compresor
- Presión de descarga del compresor
- Presión de succión del compresor

Para complementar la lectura de datos, se debe considerar el procedimiento establecido en el folleto 10-135(S1) de Sporlan [46], mediante el empleo de tablas P-T como herramienta de servicio. Esta tabla consiste en que, al conocer el fluido de trabajo y una presión, se puede determinar la temperatura del fluido, y viceversa.

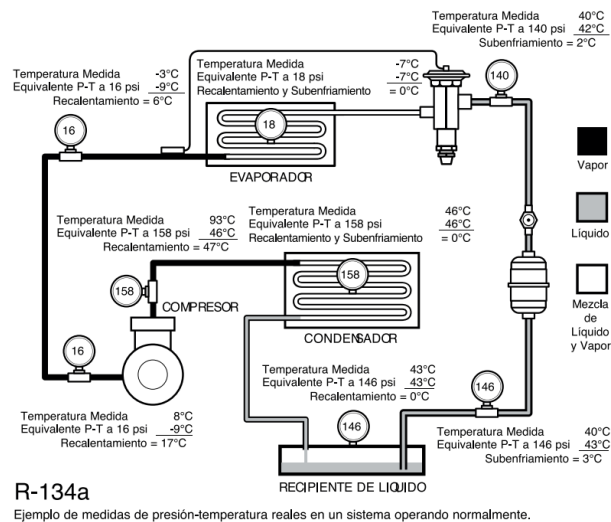


Figura 2. 6 Toma de datos en un sistema RAC con R-134a

(Fuente: [46])

En un trabajo experimental [12], se utilizan once termocuplas, de las cuales cinco son ubicadas en la entrada y salida de los componentes de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 2. 7. Otro aspecto similar a los anteriores artículos es que se emplea dos manómetros de presión a la entrada y salida del compresor.

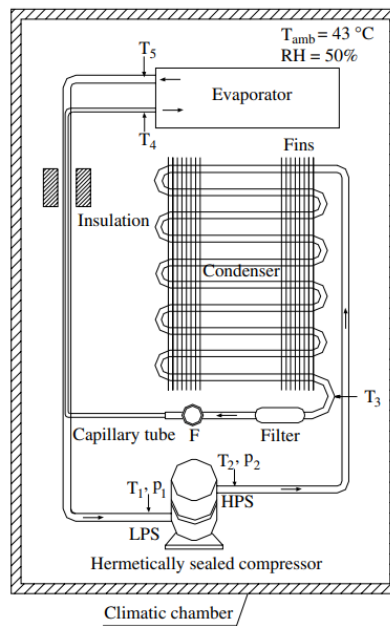


Figura 2. 7 Diagrama esquemático de la configuración experimental
(Fuente: [12])

Como ejemplo final, en el artículo [17] la instrumentación utilizada para el desarrollo del proyecto son seis termocuplas en la entrada y salida de los componentes del ciclo de refrigeración, acompañado de cuatro transductores de presión según el esquema de la Figura 2. 8.

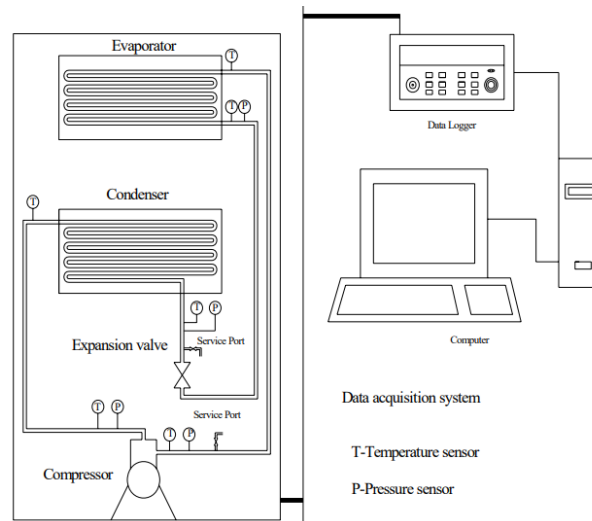


Figura 2. 8 Diagrama esquemático de la unidad de pruebas y los aparatos
(Fuente: [17])

Existen más artículos usados para el desarrollo del proyecto, los cuales en sus metodologías explican la instrumentación utilizada en sus evaluaciones experimentales. Sin embargo, no se los nombra porque la finalidad del proyecto es emplear la mínima cantidad de instrumentos para analizar el ciclo de refrigeración y que los mismos no sean invasivos para el sistema.

2.3. Definición de variables y pruebas experimentales para identificar lugares apropiados para la lectura de datos

La literatura es redundante al analizar las variables de temperatura y presión para evaluar los sistemas de refrigeración. Además, es posible evaluar el ciclo real de refrigeración controlando seis puntos específicos del sistema, esto según la bibliografía y el diagrama T-s simplificado previamente (Figura 2. 4). Según la mínima cantidad de estados específicos, el trabajo requiere la utilización de seis instrumentos no invasivos los cuales su ubicación depende del resultado obtenido en las pruebas experimentales.

Tabla 2.1 Características del equipo de refrigeración utilizado para pruebas experimentales.

Marca	HACEB
Modelo	NEV AS 370L SE 2P DA TI EX
Voltaje	115 [V]
Frecuencia	60 [Hz]
Consumo de energía	1.77 [kW h/24 h]
Potencia de descongelación	178 [W]
Tipo de gas	R600a
Cantidad de refrigerante	49 [g]
Vol. Brut. Total nominal	370 [l]
Compresor	Embraco
Modelo del compresor	EMYe 70 CLP

(Fuente: Propia)

Para las pruebas experimentales, se utiliza un refrigerador no Frost con las características de la Tabla 2.1.

2.3.1. Pruebas en el compresor

Las pruebas en el compresor consisten en dos ensayos que determinen un lugar adecuado para registrar la temperatura en el tubo de absorción y en el tubo de descarga. Para medir las temperaturas, se utiliza un microcontrolador Arduino Mega 2560, configurado para medir temperaturas con termopares tipo K.

Prueba en la tubería de absorción

Para la primera prueba, se ubican dos termopares en el tubo de absorción cerca al compresor y dos en la carcasa de este, teniendo una separación equidistante entre los instrumentos. Es necesaria esta configuración de temperaturas, considerando que la tubería del sistema es de cobre, y este material, por su buena conducción térmica, puede llegar hipotéticamente a conducir la temperatura generada por el compresor en sus cercanías. La Figura 2. 9, muestra un esquema de ubicación de los termopares para la prueba en el tubo de absorción.



Figura 2. 9 Esquema de ubicación de termopares en compresor y la tubería de absorción.
(Fuente: Propia)

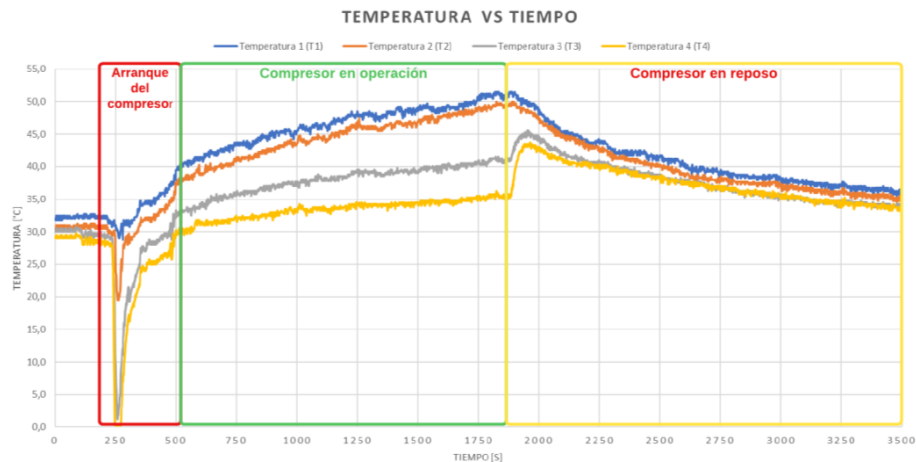


Figura 2. 10 Diagrama temperatura vs tiempo del compresor y tubo de absorción
(Fuente: Propia)

El comportamiento de la temperatura en función del tiempo en un periodo de operación del sistema se muestra en la Figura 2. 10.

Analizando el registro de las temperaturas, cuando el compresor esté operando las temperaturas en la carcasa (T1 y T2) son continuamente crecientes. Por otra parte, las temperaturas en el tubo de absorción (T3 y T4), tiene un gradiente de temperatura que los diferencia 5 °C. Por ende, la temperatura 3 más cercana al compresor es afectada por la temperatura del compresor. Esto conlleva a que se realice un análisis de caída de temperatura versus longitud en el tubo de absorción, con la finalidad de determinar una distancia donde la temperatura del compresor no afecte la temperatura del refrigerante.

Prueba de temperatura según la distancia en el tubo de absorción

Para la prueba en el tubo de absorción se utilizaron cinco termopares, distribuidos en un tramo de su longitud. El primer termopar se ubicó a 4 cm desde la carcasa del compresor y los siguientes a 2 cm cada uno.

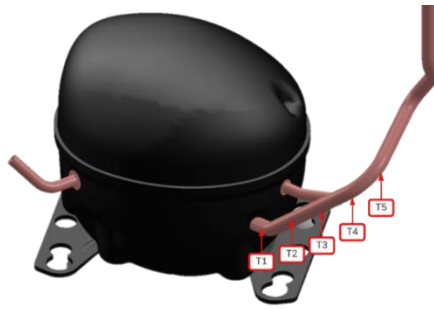


Figura 2. 11 Esquema de la ubicación de termopares en el tubo de absorción
(Fuente: Propia)

Visualmente la temperatura en función del tiempo a lo largo de la tubería se muestra en la Figura 2. 12:

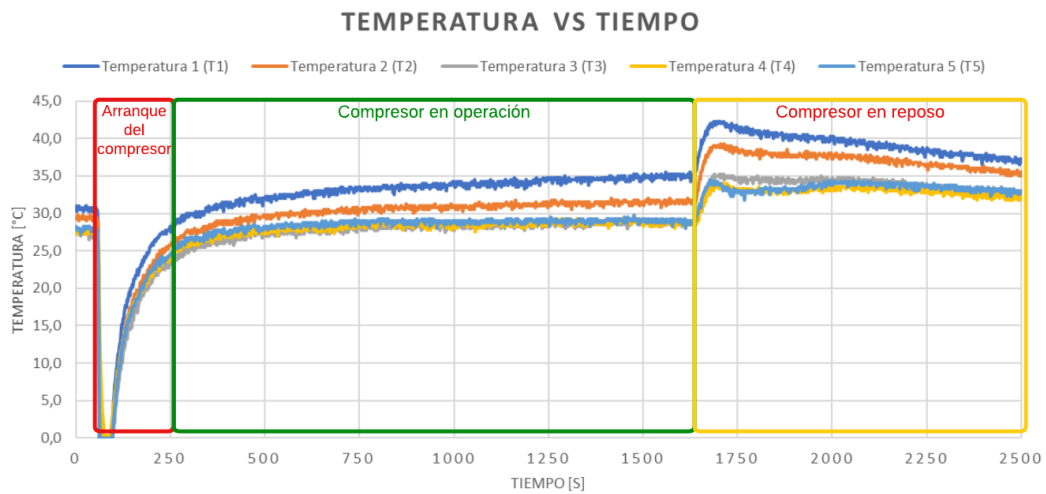


Figura 2. 12 Diagrama temperatura vs tiempo en el tubo de absorción
(Fuente: Propia)

La Figura 2. 12 permite observar que la temperatura del compresor no afecta a los termopares 3, 4, y 5. Con esto, al graficar un diagrama temperatura vs distancia se observa el comportamiento de la temperatura a lo largo del tubo de absorción.

Tabla 2.2 Valores de temperatura vs distancia para el tubo de absorción

	Distancia [cm]	Temperatura [°C]
T1	4,00	34,70
T2	6,00	31,43
T3	8,00	28,71
T4	10,00	28,74
T5	12,00	28,99

(Fuente: Propia)

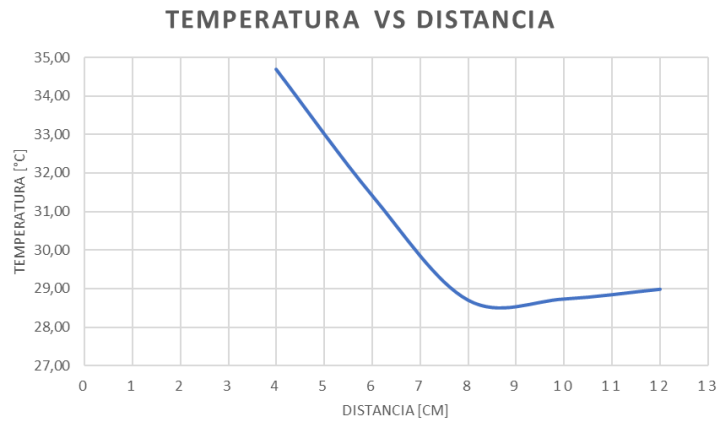


Figura 2. 13 Diagrama temperatura vs distancia para el tubo de absorción
(Fuente: Propia)

Del diagrama temperatura vs distancia (Figura 2. 13) se puede observar que, a partir de los 8 cm alejado del compresor, la temperatura no se ve afectada por el calentamiento del compresor. Por ende, se llega a la conclusión de ubicar el termopar a una distancia de 8 a 9 cm, donde la temperatura no se ve afectada por ninguno de los componentes cercanos del sistema.

Prueba en la tubería de descarga

Para la segunda prueba, se ubican dos termopares en la carcasa del compresor y en el tubo de descarga, igualmente a separaciones equidistantes. La Figura 2. 14 muestra un esquema de ubicación de los termopares.



Figura 2. 14 Esquema de ubicación de termocuplas en el compresor y tubería de descarga
(Fuente: Propia)

El comportamiento de la temperatura en función del tiempo en el tubo de descarga y el compresor se muestra en la Figura 2. 15.

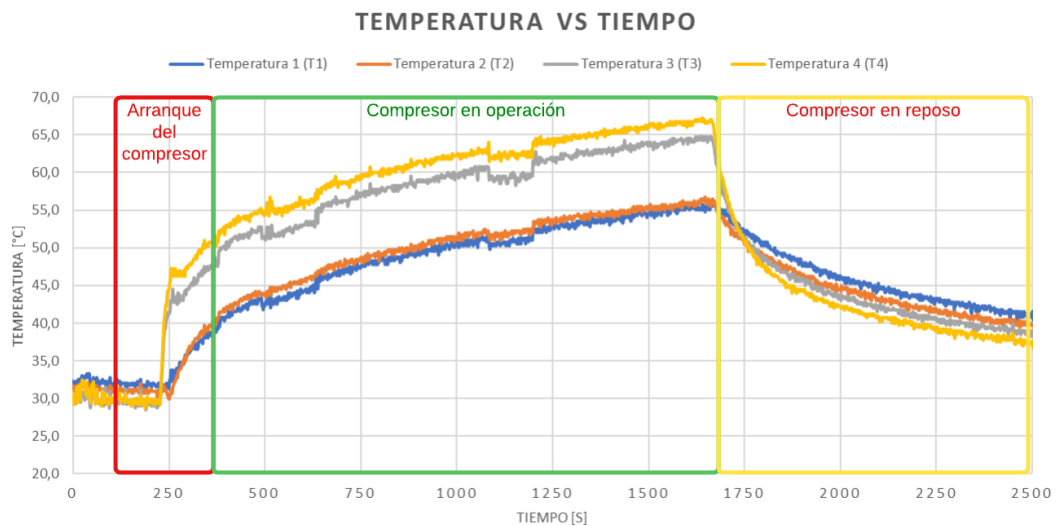


Figura 2. 15 Diagrama temperatura vs tiempo en el compresor y tubo de descarga
(Fuente: Propia)

En la Figura 2. 15 las temperaturas en la carcasa del compresor son crecientes mientras el compresor está en operación. Es de esperar que la temperatura sea mayor en el tubo de descarga, como producto del proceso de compresión. Además, existe una diferencia de temperatura entre la temperatura 3 y 4 (T3 y T4). Esto quiere decir que mientras más lejos se encuentre el sensor de temperatura del compresor, se logra medir la temperatura a la que sale el refrigerante. En consecuencia, se desarrolla un análisis temperatura versus longitud, para definir un lugar para la toma de datos en el tubo de descarga donde el refrigerante alcanza su temperatura máxima, previo a las pérdidas de calor hacia el ambiente.

Prueba de temperatura según la distancia en el tubo de descarga

Se ubican cinco termopares a lo largo del tubo de descarga, ubicando el primer sensor a 3 cm de la carcasa del compresor.

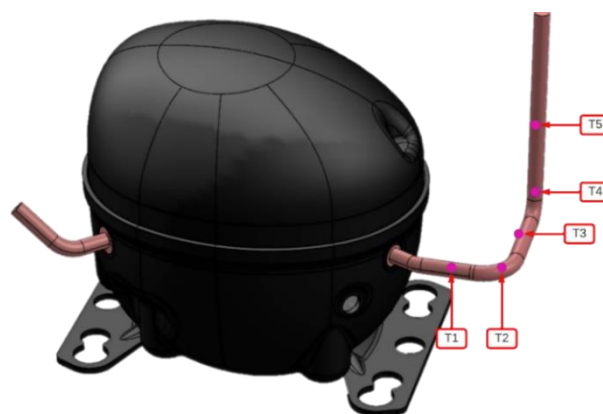


Figura 2. 16 Esquema de ubicación de termopares en el tubo de descarga.
(Fuente: Propia)

El comportamiento de la temperatura en función del tiempo se registra esquemáticamente en Figura 2. 17:

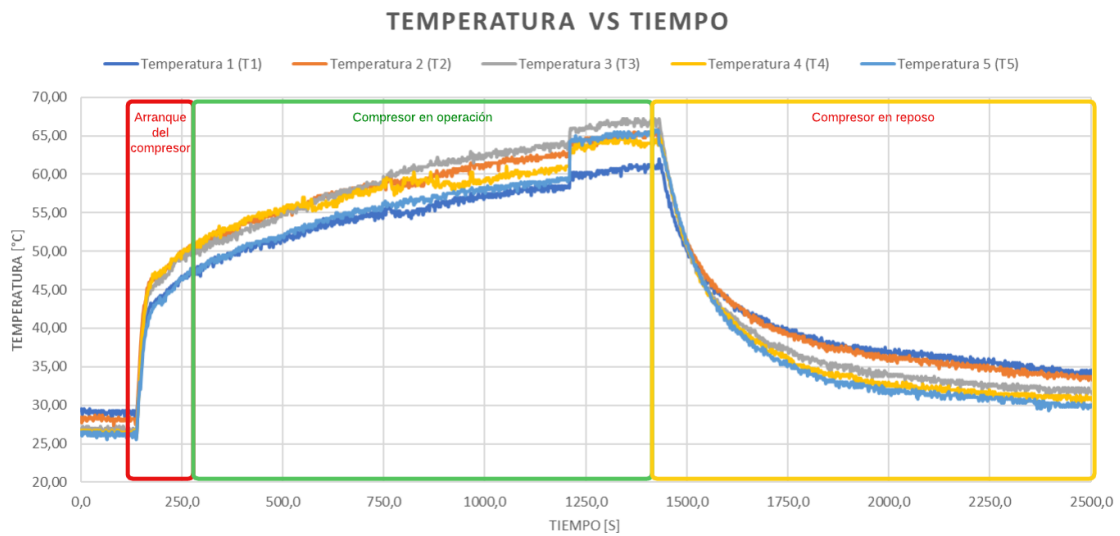


Figura 2. 17 Diagrama temperatura vs tiempo en el tubo de descarga.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2. 17, se puede observar que la temperatura predominante es la temperatura 3. Como existe una diferencia de temperaturas según la ubicación del termopar, se grafica un diagrama de temperatura vs distancia para determinar el punto óptimo para ubicar el sensor en el tubo de descarga.

Tabla 2.3 Valores de distancia vs distancia en el tubo de descarga

	Distancia [cm]	Temperatura [°C]
T1	3,00	57,85
T2	6,00	62,01
T3	9,00	63,25
T4	12,00	60,11
T5	16,00	58,69

(Fuente: Propia)

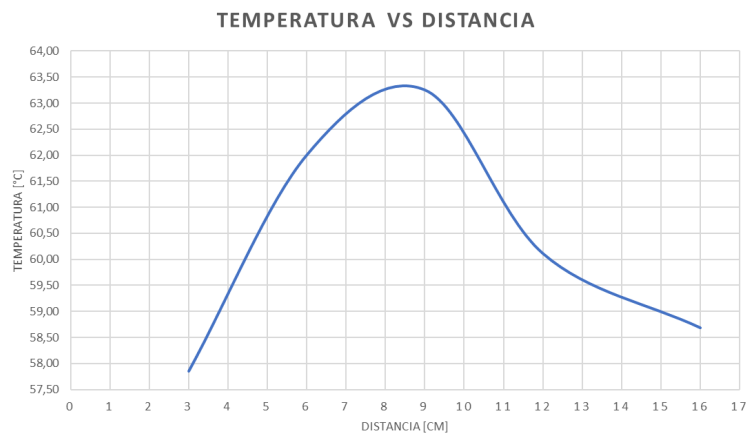


Figura 2. 18 Diagrama de temperatura vs distancia en el tubo de descarga.

(Fuente: Propia)

El comportamiento de la temperatura en función de la distancia tiene un comportamiento parabólico, alcanzando sus valores máximos en el rango de 8 a 9 cm de distancia. Con este comportamiento, se concluye que la ubicación del termopar para registrar los datos, en este caso, se ubicara a una distancia entre 8 y 9 cm.

El procedimiento realizado detalladamente para las pruebas en el compresor se lo puede observar en el ANEXO I del presente documento.

2.3.2. Pruebas en el condensador

Las pruebas en el condensador son convenientes efectuarlas teniendo en cuenta que, el refrigerante intercambia energía con el ambiente (rechaza calor), y según el diagrama T-s real (Figura 2. 4), existe un tramo donde el refrigerante desarrolla un cambio de fase de gas a líquido, a presión constante. Por lo tanto, el fin de las pruebas es identificar un punto de medición aproximado en el condensador, donde la temperatura en el cambio de fase no varíe significativamente, previo a efectuarse el subenfriamiento en el sistema.

Considerando el contexto de la prueba, en primera instancia se esquematiza la geometría del condensador con las medidas generales usando AutoCAD.

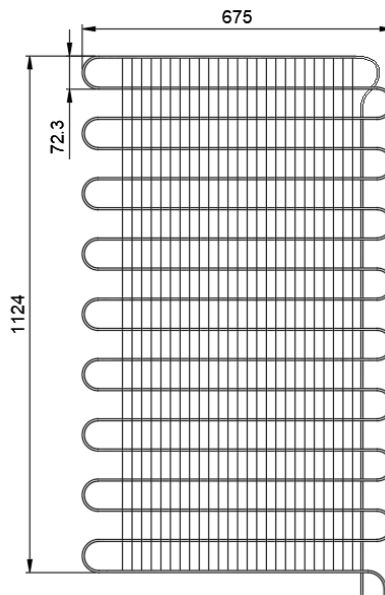


Figura 2. 19 Geometría del condensador
(Fuente: Propia)

Para el registro de información, se colocan sensores de temperatura en cada espiral del condensador, según el diagrama de la Figura 2. 20. La toma de datos se secciona en 4 tramos considerando que se tienen cinco termopares para realizar estas pruebas.

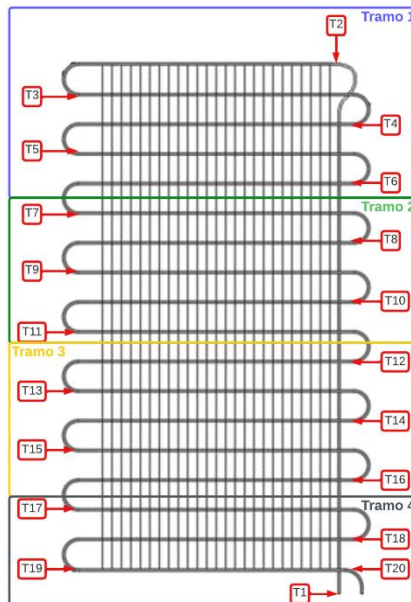


Figura 2. 20 Tramos y ubicación de termopares en el condensador
(Fuente: Propia)

Los resultados de las pruebas para cada tramo son los siguientes:

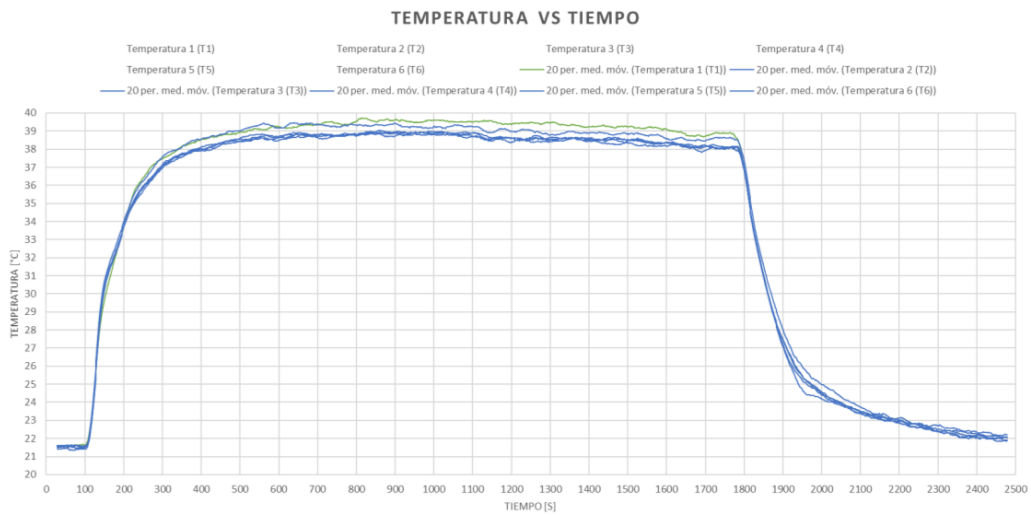


Figura 2. 21 Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 1
(Fuente: Propia)

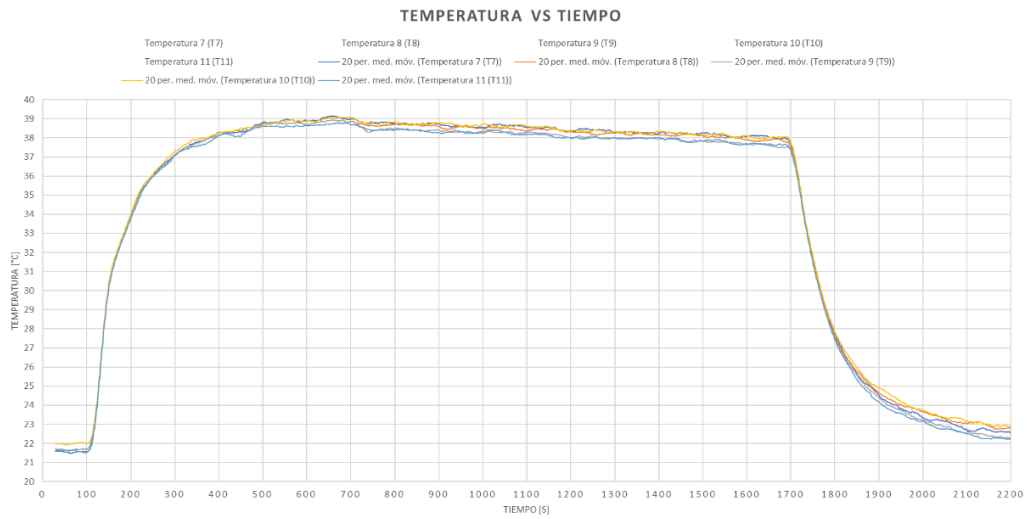


Figura 2. 22 Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 2
(Fuente: Propia)

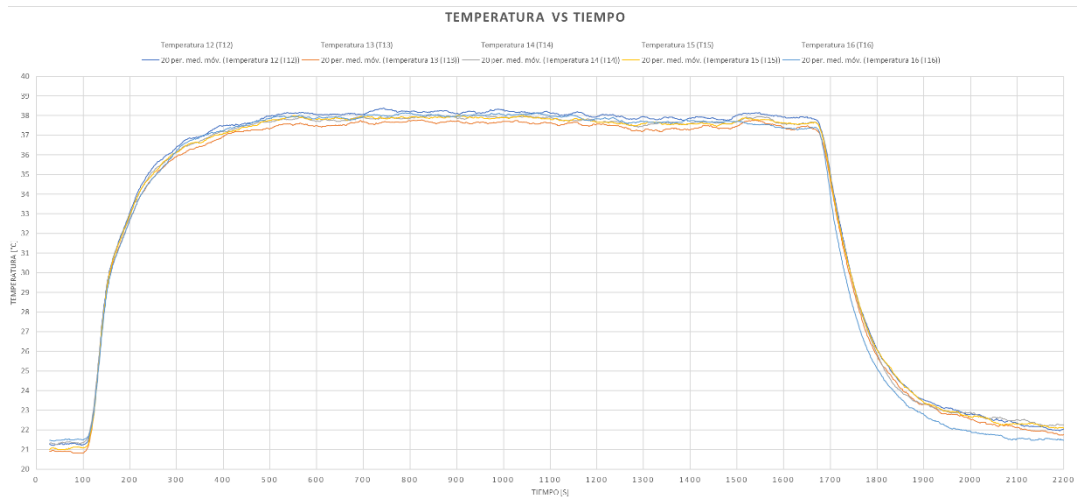


Figura 2. 23 Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 3
(Fuente: Propia)

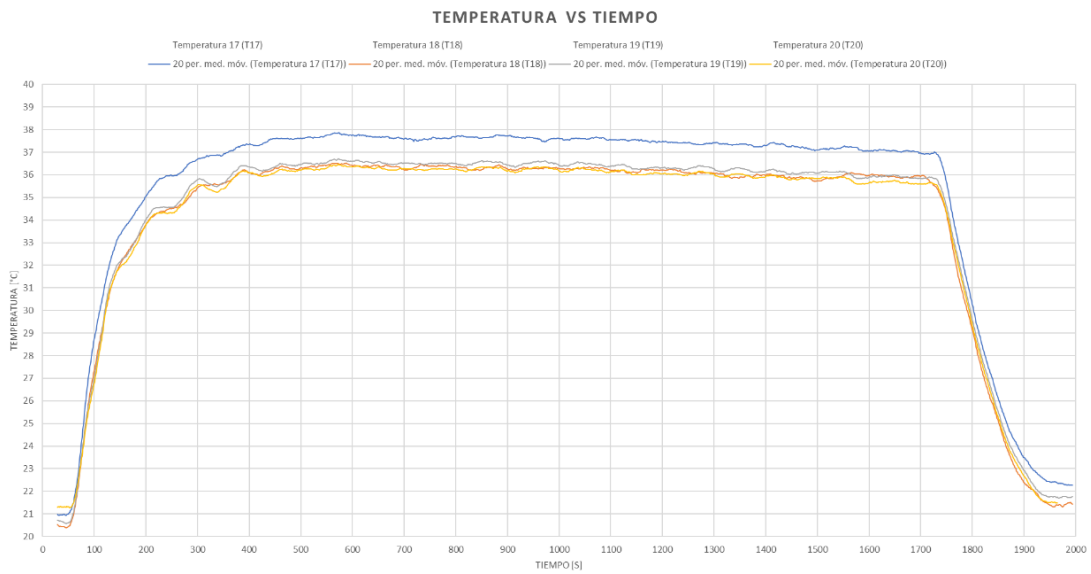


Figura 2. 24 Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 4
(Fuente: Propia)

Los resultados de temperatura se tabulan para cada termopar obteniendo la siguiente tabla:

Tabla 2.4 Tabla de temperaturas en el condensador

	T1	T2	T3	T4	T5
Temperatura [°C]	38,83	38,56	38,07	38,17	38,16
	T6	T7	T8	T9	T10
Temperatura [°C]	38,15	38,10	37,95	37,71	38,08
	T11	T12	T13	T14	T15
Temperatura [°C]	37,74	37,96	37,54	37,72	37,70
	T16	T17	T18	T19	T20
Temperatura [°C]	37,45	37,06	35,96	35,90	35,65

(Fuente: Propia)

Según la Tabla 2.4, entre los tramos 2 y 3 del condensador, no existe una variación de temperatura considerable en el sistema. Es evidente que en el tramo 4 es donde existe una caída de temperatura de 1,5 °C aproximadamente, produciendo el subenfriamiento al refrigerante. Bajo los resultados de las pruebas realizadas, un termopar se ubicará en la parte central del condensador siempre y cuando este sea accesible.

Más a detalle del procedimiento realizado para las pruebas en el condensador, se encuentra en el ANEXO II.

2.3.3. Pruebas en el tubo capilar

La prueba en el tubo capilar permite determinar un punto de medición al final del subenfriamiento y previo a la caída de temperatura el refrigerante por este componente. Se realiza esta prueba tomando en cuenta que en los refrigeradores existen intercambiadores de calor, los cuales son implementados para mejorar el COP y por motivos de seguridad del compresor. Es teórico que el refrigerante en el tubo capilar se enfría a entalpía constante, sin embargo, esto no se cumple en la práctica, puesto que existe transferencia de calor entre el tubo capilar y el tubo de absorción. Según [47], existen 3 configuraciones que se realizan para los intercambiadores de calor.

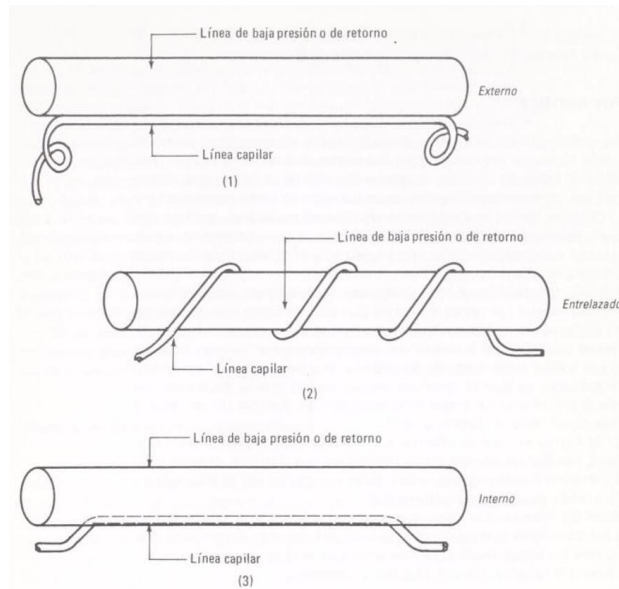


Figura 2. 25 Configuraciones para intercambiadores de calor con tubos capilares
(Fuente: [47])

Las configuraciones de la Figura 2. 25 corresponden a las siguientes:

1. El tubo capilar va soldado a la tubería de retorno.
2. El tubo capilar se enrolla en la tubería de retorno.
3. El tubo capilar va internamente por la tubería de retorno.

En casos donde se encuentren intercambiadores de calor en los refrigeradores, no se debe ubicar el termopar cerca a estas configuraciones, puesto que generarían errores de medición de temperatura.

En el refrigerador de estudio, se tienen dos configuraciones de intercambiadores de calor según el esquema de la Figura 2. 26.

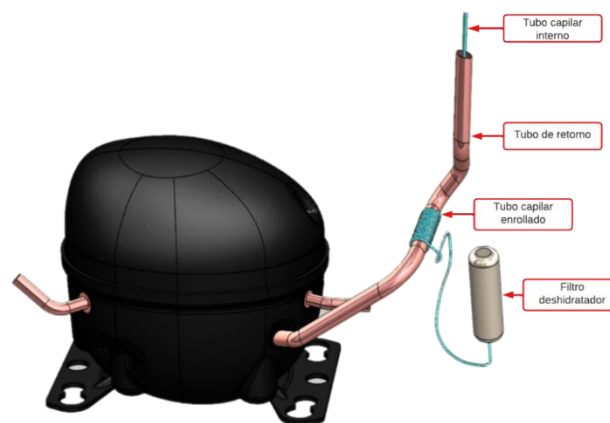


Figura 2. 26 Arreglos en el sistema con el tubo capilar.
(Fuente: Propia)

Para determinar la caída de temperatura a lo largo del dispositivo de expansión, se analiza la caída de temperatura a lo largo del tubo capilar no enrollado.

La ubicación de los termopares en el tubo capilar no enrollado se muestra en la Figura 2. 27.

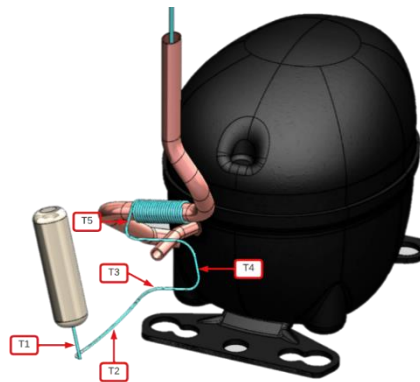


Figura 2. 27 Ubicación de termopares en el tubo capilar no enrollado
(Fuente: Propia)

La longitud aproximada no enrollada del tubo es de 30 centímetros. Por lo tanto, los 5 termopares se han distribuido equitativamente a lo largo de este tramo. Los resultados fueron los siguientes:

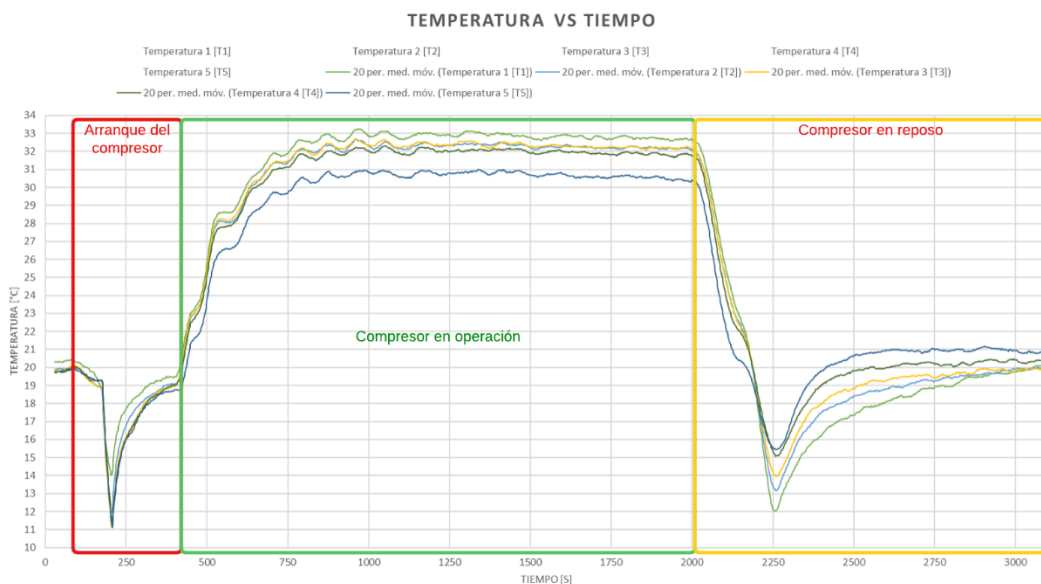


Figura 2. 28 Diagrama temperatura vs tiempo en el tubo capilar
(Fuente: Propia)

Analizando los valores obtenidos en la parte más estable de temperatura, las temperaturas se promedian y se tabulan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Caída de temperatura a lo largo del tubo capilar externo

Resultados	T1	T2	T3	T4	T5
Unidad [°C]	32,82	32,25	32,29	31,95	30,67

(Fuente: Propia)

Los resultados muestran que, en 30 cm del tubo capilar, la caída de temperatura es de aproximadamente 2 °C, por ende, se considera que ubicar un termopar en la parte inicial o

intermedia del tubo capilar externo, es factible considerando que la temperatura no varía notablemente. Además, otra razón por la cual es factible ubicar en este sector es por la diferencia de temperatura que existe entre la entrada al filtro deshidratador y la salida de este. La temperatura con la que ingresa el refrigerante (T20, Tabla 2.4) es de 35.65 °C y la temperatura de salida (T1, Tabla 2.5) es de 32.82 °C, dando una diferencia de temperatura de 3 °C aproximadamente. Esto quiere decir que, la masa del filtro deshidratador hace que el refrigerante pierda energía y se enfríe, dando como resultado un primer subenfriamiento del sistema, el cual es necesario registrar para el análisis del sistema.

Otro análisis importante por considerar es el intercambiador de calor en forma de espiral realizado en un tramo del tubo de absorción. Para realizar este análisis, es adecuado ubicar dos termopares en el inicio y final del intercambiador, y otros dos termopares a la entrada y salida del arreglo en el tubo de absorción. La ubicación de termopares es de acuerdo al esquema de la .

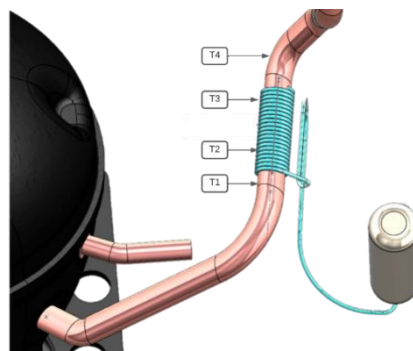


Figura 2. 29 Ubicación de termopares en el intercambiador de calor y el tubo de absorción
(Fuente: Propia)

Posterior a la ubicación de los termopares y el registro de los datos, se obtuvieron los siguientes resultados.

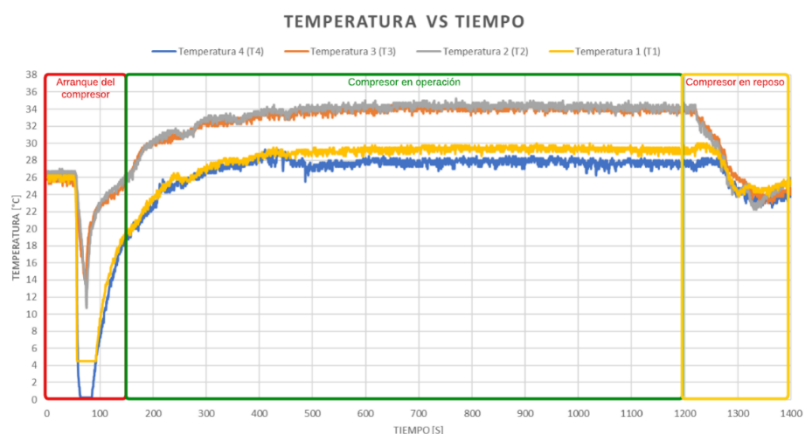


Figura 2. 30 Diagrama temperatura vs tiempo en el intercambiador de calor
(Fuente: Propia)

Para analizar el efecto del intercambiador de calor, según la Figura 2. 30 se analiza las temperaturas obtenidas entre 500 y 1200 segundos. Con esto se obtiene una temperatura promedio según la siguiente tabla.

Tabla 2.6 Resultados numéricos obtenidos en el intercambiador de calor

Resultados	T1	T2	T3	T4
Unidad [°C]	29.29	34.30	34.02	27.75

(Fuente: Propia)

Los resultados muestran que la temperatura en el intercambiador de calor es aproximadamente 34 °C y el aumento de temperatura del refrigerante en el tubo de absorción es de 1.5 °C.

Una vez analizado el comportamiento de la temperatura a lo largo del tubo capilar, se considera adecuado no ubicar termopares cerca del intercambiador de calor, debido a que la temperatura es similar a la entrada del filtro deshidratador (T20, Tabla 2.4). Por ende, se considera ubicar el termopar a la entrada del dispositivo de expansión y para interactuar, suponer temperaturas de enfriamiento basándose en bibliografías.

2.3.4. Pruebas en el evaporador

Las pruebas en el evaporador son factibles para el proyecto, considerando que, para acceder a este componente, en muchos equipos hay que desarmar la cabina donde está ubicado el evaporador. Sin embargo, el hecho de desarmar el equipo no pierde el objetivo del trabajo de no ser invasivo netamente para el sistema de refrigeración, puesto que no se realizan modificaciones al ciclo, sino solo al equipo que lo contiene.

Aclarado el sentido de la prueba, para este caso se usaron 2 termopares, acoplados a sus respectivos módulos que permiten medir temperaturas menores a los 0 °C y la ubicación de cada uno de ellos, se representa en la Figura 2. 31.

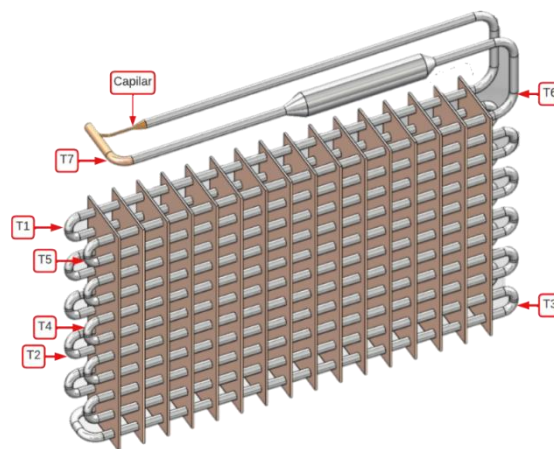


Figura 2. 31 Ubicación de termopares en el evaporador

(Fuente: Propia)

Las temperaturas registradas en función del tiempo se muestran en la Figura 2. 32:

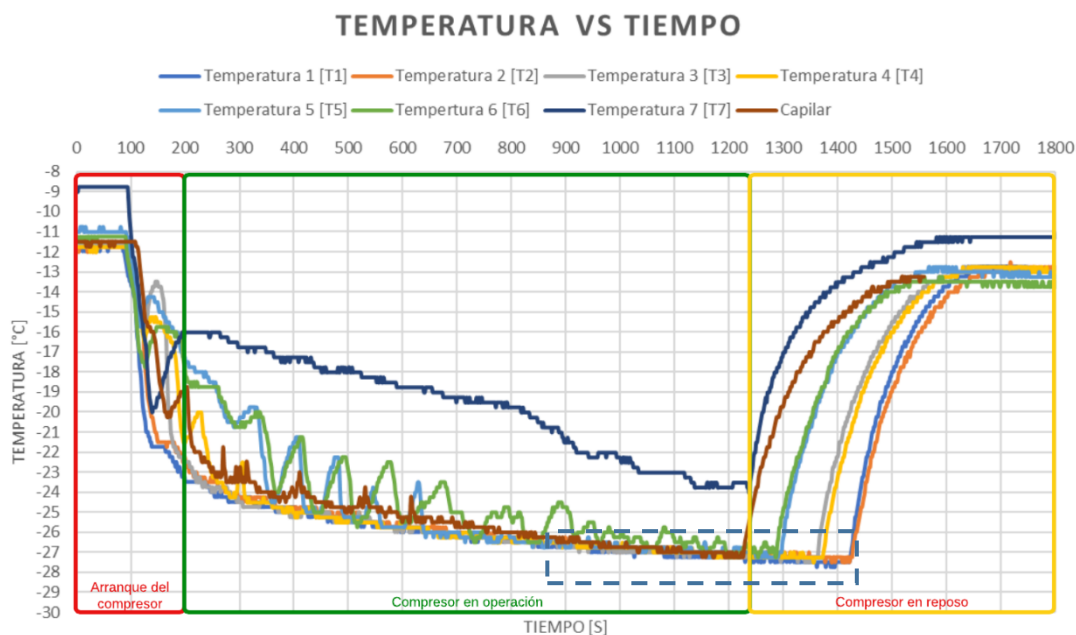


Figura 2. 32 Resultados obtenidos en las pruebas del evaporador
(Fuente: Propia)

Los resultados muestran un comportamiento diferente en cada punto del evaporador.

Tabla 2.7 Temperatura promedio en diferentes puntos del evaporador

Resultados	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Capilar
Unidad [°C]	-27.17	-26.98	-27.04	-26.93	-26.84	-26.48	-23.31	-26.83

(Fuente: Propia)

Analizando por partes, la temperatura en el tubo capilar y los termopares 1, 2, 3 no tienen temperatura fluctuante como en los casos siguientes. Se supone que el refrigerante comprimido en este tramo se encuentra en estado líquido, considerando que las sustancias en estado líquido tienen mayor calor específico, por ende, es más difícil que cambien su estado con poca energía absorbida.

Por consiguiente, el tramo comprendido en los termopares 4,5,6,7, miden la temperatura del refrigerante en cambio de fase debido a que la temperatura es fluctuante y al tener una mayor calidad, el calor específico se reduce, por ende, es más fácil que el refrigerante llegue a evaporarse.

En relación con el análisis realizado, es conveniente ubicar los termopares al final de la expansión y en la parte central del evaporador.

Una vez finalizadas las pruebas experimentales realizadas en los componentes del sistema, se definen los lugares de los termopares para la lectura de datos y la cantidad necesaria de instrumentos, los cuales son ubicados en las siguientes posiciones:

- Entrada del compresor (Distanciado 8 a 9 cm)

- Salida del compresor (Distanciado 8 a 9 cm)
- Mitad del condensador
- Entrada del dispositivo de expansión
- Salida del dispositivo de expansión
- Mitad del evaporador

Un esquema de componentes muestra los lugares importantes para la lectura o toma de datos.

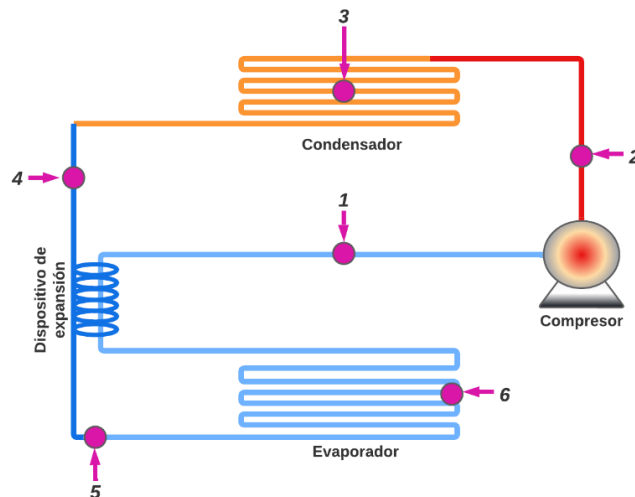


Figura 2. 33 Ubicación de puntos de lectura en el diagrama de componentes
(Fuente: Propia)

Mas información de las pruebas en el evaporador, se encuentra en el ANEXO III.

2.4. Ecuaciones termodinámicas asociadas a los ciclos de refrigeración

La temática explica que, para evaluar los sistemas de refrigeración, se debe analizar los resultados correspondientes al COP y la cantidad de trabajo consumido en el proceso de compresión. No existe una metodología reglamentaria para encontrar estos resultados. Sin embargo, el desarrollo inicia con la deducción y cálculo de estados termodinámicos (Presiones, temperaturas, entalpías, entropías, etc.), mismos que se representan en un diagrama Presión-entalpía (P-h) o Temperatura-entropía (T-s), según corresponda. Por consiguiente, se calcula calores de entrada y salida, el trabajo del compresor, y se finaliza con el cálculo del COP. Prácticamente, un sistema de refrigeración con estados y procesos definidos es similar a la Figura 2. 34:

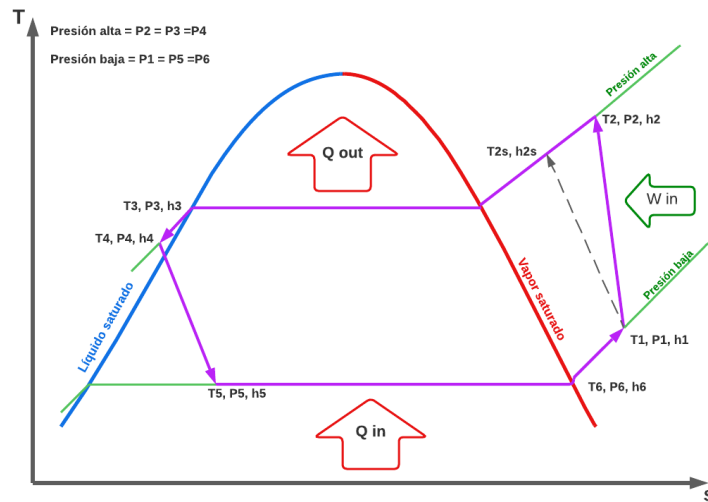


Figura 2. 34 Diagrama T-s para un ciclo real de refrigeración
(Fuente: Propia)

Al definir los estados y procesos involucrados, el cálculo de los diferentes procesos, se lo realiza basándose en las ecuaciones del libro de termodinámica de Yunus Cengel [45], capítulo 11.

2.4.1. Ecuaciones para el calor de entrada y salida

El calor de entrada es la energía que absorbe el refrigerante de las cargas internas en el compartimento del evaporador. La ganancia de calor teóricamente se encuentra entre los estados 5 y 6 según la Figura 2. 34. No se considera el tramo 5 y 6, puesto que esta es una ganancia de calor por la temperatura del ambiente fuera del evaporador. El calor de entrada se define como:

$$q_{in} = h_6 - h_5 \quad (1)$$

Donde:

q_{in} : Calor de entrada [kJ/kg]

h_6 : Entalpía en el estado 6 [kJ/kg]

h_5 : Entalpía en el estado 5 [kJ/kg]

Por otra parte, el calor de salida se produce en el condensador. Los estados pertenecientes al condensador son 2, 3 y 4. Los estados 2 y 4 determinan el calor de salida.

$$q_{out} = h_4 - h_2 \quad (2)$$

Donde:

q_{out} Calor de salida [kJ/kg]

h_4 : Entalpía en el estado 4 [kJ/kg]

h_2 : Entalpía en el estado 2 [kJ/kg]

2.4.2. Ecuación para el trabajo del compresor

El trabajo del compresor es un valor importante que considerar, pues, la energía requerida para elevar la presión de un gas tiene relación directa en el consumo eléctrico del sistema. La literatura explica que, el área bajo la curva entre las entalpías de los estados 1 y 2, está compuesta por el trabajo realizado por el compresor y el calor rechazado en el proceso. Debido a que, en este proceso de compresión existen pérdidas de energía por la ineficiencia del mismo compresor, el proceso de compresión puede realizarse bajo tres supuestos:

Compresión isentrópica

La entropía en el proceso de compresión isentrópica es constante. No existe pérdida de energía ($Q_{out} = 0$)

$$w_{comp,entrada} = \frac{k \cdot R \cdot (T_{2s} - T_1)}{k - 1} \quad (3)$$

Donde:

k : Exponente isoentálpico (Tabla A-1, [45])

R : Constante del gas [kJ/kg.K]

T_{2s} : Temperatura isentrópica en el estado 2 [K]

T_1 : Temperatura en el estado 1 [K]

Compresión isotérmica

La temperatura en el proceso de compresión isotérmica es constante. El rechazo de calor es máximo y el enfriamiento del compresor es forzado.

$$w_{comp,entrada} = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (4)$$

Donde:

R : Constante del gas [kJ/kg.K]

T : Temperatura de compresión [K]

P_1 : Presión en el estado 1 [Pa]

P_2 : Presión en el estado 2 [Pa]

Compresión politrópica

La compresión politrópica es aplicable para los casos reales, pues el trabajo y el calor dependen del exponente politrópico. Si el exponente politrópico “n” es menor y cercano a 1, el calor rechazado es mayor y viceversa.

$$w_{comp,entrada} = \frac{n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)}{n - 1} \quad (5)$$

Donde:

n : Exponente politrópico

R : Constante del gas [kJ/kg.K]

T_2 : Temperatura en el estado 2 [K]

T_1 : Temperatura en el estado 1 [K]

Trabajo ideal

Para el caso de un trabajo ideal, la diferencia de entalpías en una compresión isentrópica determina el valor de este. El trabajo ideal se calcula como:

$$w_{in} = h_{2s} - h_1 \quad (6)$$

Donde:

w_{in} : Trabajo de entrada [kJ/kg]

h_{2s} : Entalpía en el estado 2 ideal [kJ/kg]

h_1 : Entalpía en el estado 1 [kJ/kg]

2.4.3. Ecuación del coeficiente de desempeño (COP)

El COP define la eficiencia de un sistema de refrigeración, midiendo la relación de cantidad de calor removida de un espacio refrigerado, con el trabajo requerido para lograrlo [45].

$$COP_R = \frac{q_{in}}{w_{in}} = \frac{q_{in}}{q_{out} - q_{in}} \quad (7)$$

Donde:

COP_R : Coeficiente de desempeño

w_{in} : Trabajo de entrada [kJ/kg]

q_{in} : Calor de entrada [kJ/kg]

q_{out} : Calor de salida [kJ/kg]

2.5. Selección de instrumentos

En la presente sección, se detalla el procedimiento establecido para seleccionar la instrumentación adecuada para realizar el diseño conceptual del prototipo. Básicamente, los componentes principales para desarrollar el proyecto son los sensores de temperatura y el controlador.

Para elegir el instrumento adecuado, se toma en referencia el *método ordinal corregido de criterios ponderados*, propuesto en el libro de Carles Riba [48], para lo cual se han propuesto los siguientes criterios: bajo costo de adquisición, menor peso, disponibilidad en el mercado, y alta versatilidad. Basándose en el método de los criterios ponderados, se considera la mejor opción resultante.

2.5.1. Selección de sensores

De acuerdo con la revisión bibliográfica, existen diferentes estudios y trabajos realizados para evaluar los ciclos de refrigeración. Por consiguiente, en las metodologías aplicadas se detallan los instrumentos utilizados para cumplir el propósito de los trabajos.

Con respecto a la medición de temperatura, los siguientes sensores de temperatura son los típicamente usados en este tipo trabajos:

- Termopar
 - o Tipo J [19], [29].
 - o Tipo K [19], [30].
 - o Tipo T [4], [19].
- Termómetros de resistencia [5], [7], [18].
- Termómetros digitales [20].
- Sensor digital [6], [34].

No se descarta que existan más estudios similares al presente trabajo y que se emplee otro tipo de sensores. Sin embargo, la mayoría de los trabajos son experimentales, por lo que la adquisición y montaje debe ser de manera sencilla, sin dejar de lado la precisión de cada instrumento.

Según el *Método ordinal corregido de criterios ponderados*, establecido por Carles Riba [48], el criterio es aplicable cuando se tiene diversas opciones para desarrollar un diseño conceptual, debido a que toma en consideración criterios evaluación globales, sin considerar las propiedades o características de los componentes [48].

A manera resumida, el método consiste primeramente en realizar una de criterios establecidos por el diseñador, para este caso:

- Menor peso
- Bajo costo
- Alta versatilidad
- Disponibilidad en el mercado.

La ponderación se lo realiza según la siguiente numeración [48]:

- 1: Criterio de las filas predomina con respecto al criterio de las columnas
- 0.5: Ninguno de los criterios predomina.
- 0: Criterio de las columnas predomina con respecto al criterio de las filas

Se pondera cada criterio y se aumenta una unidad al resultado final para evitar que la ponderación sea nula. Con los resultados obtenidos, se jerarquiza la importancia de cada criterio, para posteriormente comparar cada instrumento según un criterio específico.

De acuerdo con lo descrito previamente, se inicia ponderando los criterios establecidos:

Tabla 2.8 Ponderación de los criterios de evaluación para sensores

Disponibilidad > Costo > Peso = Versatilidad						
Criterio	Disponibilidad	Costo	Peso	Versatilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Disponibilidad		1	1	1	4	0,4
Costo	0		1	1	3	0,3
Peso	0	0		0,5	1,5	0,15
Versatilidad	0	0	0,5		1,5	0,15
Suma					10	1

(Fuente: Propia)

De la Tabla 2.8, se obtiene el orden de ponderación de cada criterio:

- Disponibilidad
- Costo
- Peso y Versatilidad

A continuación, se realiza la ponderación de los instrumentos enlistados para un criterio específico:

Disponibilidad en el mercado

Tabla 2.9 Ponderación de los sensores según la disponibilidad en el mercado

Termocupla = Termómetro de resistencia = Sensor digital > Termómetro digital						
Disponibilidad	Termopar	Termómetro de resistencia	Termómetro digital	Sensor digital	$\Sigma+1$	Ponderación
Termocupla		0,5	1	0,5	3	0,300
Termómetro de resistencia	0,5		1	0,5	3	0,300
Termómetro digital	0	0		1	2	0,200
Sensor digital	0,5	0,5	0		2	0,200
Suma					10	1

(Fuente: Propia)

El resultado de la ponderación de acuerdo a su disponibilidad en el mercado resulta el siguiente:

- Termopar y Termómetro de Resistencia
- Sensor y Termómetro digitales

Bajo costo

Tabla 2.10 Ponderación de los sensores de acuerdo al bajo costo

Termocupla > Termómetro de resistencia > Sensor digital > Termómetro digital						
Costo	Termopar	Termómetro de resistencia	Termómetro digital	Sensor digital	$\Sigma+1$	Ponderación
Termocupla		1	1	1	4	0,400
Termómetro de resistencia	0		1	1	3	0,300
Termómetro digital	0	0		1	2	0,200
Sensor digital	0	0	0		1	0,100
Suma					10	1

(Fuente: Propia)

El resultado de la ponderación de acuerdo al bajo costo que tienen en el mercado es el siguiente:

- Termopar
- Termómetro de Resistencia
- Termómetro digital
- Sensor digital

Menor peso

Tabla 2.11 Ponderación de los sensores de acuerdo al menor peso

Termocupla = Termómetro de resistencia > Sensor digital > Termómetro digital						
Peso	Termopar	Termómetro de resistencia	Termómetro digital	Sensor digital	$\Sigma+1$	Ponderación
Termocupla		0,5	1	1	3,5	0,350
Termómetro de resistencia	0,5		1	1	3,5	0,350
Termómetro digital	0	0		0	1	0,100
Sensor digital	0	0	1		2	0,200
				Suma	10	1

(Fuente: Propia)

El resultado de la ponderación de acuerdo al menor peso que tiene cada instrumento es el siguiente:

- Termopar y Termómetro de resistencia
- Sensor Digital
- Termómetro digital

Alta versatilidad

Tabla 2.12 Ponderación de los sensores de acuerdo a su versatilidad

Termocupla = Termómetro de resistencia = Sensor digital > Termómetro digital						
Versatilidad	Termopar	Termómetro de resistencia	Termómetro digital	Sensor digital	$\Sigma+1$	Ponderación
Termocupla		0,5	1	0,5	3	0,30
Termómetro de resistencia	0,5		1	0,5	3	0,30
Termómetro digital	0	0		0	1	0,10
Sensor digital	0,5	0,5	1		3	0,30
				Suma	10	1

(Fuente: Propia)

El resultado de la ponderación de acuerdo a su versatilidad es el siguiente:

- Termopar, Termómetro de resistencia, y sensor digital
- Termómetro digital

Al haber realizado la ponderación de acuerdo a un criterio específico, se realiza la tabla de conclusiones, la cual determina qué tipo de instrumento es el más adecuado para el diseño conceptual.

Tabla 2.13 Conclusiones para la selección del sensor de temperatura

Conclusiones	Disponibilidad	Costo	Peso	Versatilidad	Σ	Prioridad
Termocupla	0,12	0,12	0,05	0,05	0,34	1
Termómetro de resistencia	0,12	0,09	0,05	0,05	0,31	2
Termómetro digital	0,08	0,06	0,02	0,02	0,17	4
Sensor digital	0,08	0,03	0,03	0,05	0,19	3

(Fuente: Propia)

De acuerdo con la tabla de conclusiones, se establece el orden de prioridad de la selección de instrumentos, por lo que la prioridad es la siguiente:

- Termopar
- Termómetro de resistencia
- Sensor digital
- Termómetro digital

Según las conclusiones, el termopar tiene la mayor prioridad, debido a sus características y facilidades que posee.

El termopar a utilizar es tipo K, considerando su comercialidad y los módulos asociados para la lectura de datos. Los módulos empleados para transferir información, especialmente con microcontroladores, es la serie MAX con numeración 6675 y 31855.

Diferencia entre módulo MAX6675 y MAX31855

Ambos módulos tienen la característica de tener un circuito integrado que permite transformar la señal análoga en digital y transferir la información a cualquier microcontrolador. La diferencia entre ambos módulos es el rango de temperatura que pueden trabajar:

- MAX6675: Temperatura de 0 °C a 1024 °C.
- MAX31855: Temperatura de -270 °C a 1800 °C.

Considerando los lugares específicos para medir las temperaturas, se asocia un módulo adecuado para cada termopar. Al tener seis sitios de medición de temperatura, cuatro de estos puntos se encuentran en el exterior del equipo de refrigeración y dos en la parte interna, por ende, es adecuado considerar cuatro módulos MAX6675 para los termopares T1, T2, T3, T4, adecuados para medir temperaturas mayores a 0° y dos módulos MAX31855 para los termopares T5 y T6, los cuales miden temperaturas menores a 0°.

2.5.2. Selección de controladores

Los controladores son los instrumentos complementarios para la toma de datos de los trabajos experimentales. La mayoría de este tipo de instrumentos son multifuncionales, refiriéndose a que pueden controlar diferentes variables físicas como mecánicas. No obstante, existen también controladores que son explícitamente dedicados al control de una sola variable.

De acuerdo a las necesidades del trabajo, se requiere que el controlador tenga posibilidad de controlar mínimo dos variables físicas (Temperatura y presión), pues para definir un ciclo termodinámico, se requiere que al menos dos de sus estados estén completamente definidos.

Según las referencias, los controladores típicamente usados son:

- Módulo multiplexor [30];
- Controlador de temperatura [7], [20], [34];
- Controlador lógico programable:
 - o ARRAY 100 [20];
- Controlador Compact Río [19];
- Microcontrolador:
 - o Tarjeta Arduino DAQ, [6], [10], [18];
- Data logger [4], [12]:
 - o HP data logger [17].

En muchos de los trabajos revisados, no se detalla las especificaciones de los controladores, debido a que se considera no relevante para el estudio. Algunos de estos, se los menciona según la propiedad física que se analiza (Controlador de temperatura, controlador de presión, etc.).

Por otra parte, pocos son los controladores capaces de trabajar con más de una propiedad física (Temperatura, presión, flujo másico, etc.), lo cual reduce la cantidad de opciones a seleccionar. Bajo estas consideraciones, para seleccionar el controlador de acuerdo al *Método ordinal corregido de criterios ponderados* [48], se considera los siguientes controladores:

- Controlador Lógico Programable
- Controlador Compac Río
- Microcontrolador
- Data Logger

Los criterios de selección para el controlador son los siguientes:

- Menor Peso
- Menor Costo
- Disponibilidad en el mercado
- Facilidad de programación
- Versatilidad con instrumentos

A continuación, se procede a realizar la ponderación de los criterios específicos para determinar el peso de importancia por cada uno:

Tabla 2.14 Ponderación de los criterios de evaluación para controladores

Disponibilidad > Costo > Peso > Programación = Versatilidad							
Criterio	Disponibilidad	Costo	Peso	Programación	Versatilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Disponibilidad		1	1	1	1	5	0,333
Costo	0		1	1	1	4	0,267
Peso	0	0		1	1	3	0,200
Programación	0	0	0		0,5	1,5	0,100
Versatilidad	0	0	0	0,5		1,5	0,100
				Suma		15	1

(Fuente: Propia)

De la Tabla 2.14, se obtiene el orden de los criterios de evaluación, el cual es el siguiente:

- Disponibilidad
- Costo
- Peso
- Programación y Versatilidad

Establecido el orden de importancia de acuerdo al peso de cada criterio, se procede a realizar la ponderación para cada criterio específico.

Disponibilidad en el mercado

Tabla 2.15 Ponderación de los controladores según su disponibilidad en el mercado

PLC = Microcontrolador = Data Logger > Compact RIO						
Disponibilidad	PLC	Compact RIO	Microcontrolador	Data logger	$\Sigma+1$	Ponderación
PLC		1	0,5	0,5	3	0,300
Compact RIO	0		0	0	1	0,100
Microcontrolador	0,5	1		0,5	3	0,300
Data logger	0,5	1	0,5		3	0,300
Suma					10	1

(Fuente: Propia)

El resultado de la ponderación de acuerdo a la disponibilidad que tiene en el mercado resulta:

- PLC
- Microcontrolador
- Data logger
- Controlador Compact Río

Menor costo

Tabla 2.16 Ponderación de controladores de acuerdo al menor costo

Microcontrolador > Data Logger > PLC > Compact RIO						
Costo	PLC	Compact RIO	Microcontrolador	Data logger	$\Sigma+1$	Ponderación
PLC		1	0	0	2	0,200
Compact RIO	0		0	0	1	0,100
Microcontrolador	1	1		1	4	0,400
Data logger	1	1	0		3	0,300
Suma					10	1

(Fuente: Propia)

De acuerdo a la ponderación según el menor costo de cada controlador, resulta el siguiente orden:

- Microcontrolador
- Data logger
- PLC
- Controlador Compact RIO

Menor peso

Tabla 2.17 Ponderación de controladores de acuerdo al menor peso

Microcontrolador = Data Logger > PLC > Compact RIO						
--	--	--	--	--	--	--

Peso	PLC	Compact RIO	Microcontrolador	Data logger	$\Sigma+1$	Ponderación
PLC		1	0	0	2,0	0,2
Compact RIO	0		0	0	1,0	0,1
Microcontrolador	1	1		0,5	3,5	0,35
Data logger	1	1	0,5		3,5	0,35
				Suma	10,0	1

(Fuente: Propia)

De la ponderación realizada para el menor peso, se obtiene el siguiente orden:

- Microcontrolador y Data logger
- PLC
- Compact RIO

Facilidad de programación

Tabla 2.18 Ponderación de controladores de acuerdo a la facilidad de programación

Data logger > Microcontrolador = PLC > Compact RIO						
Programación	PLC	Compact RIO	Microcontrolador	Data logger	$\Sigma+1$	Ponderación
PLC		1	0,5	0	2,5	0,25
Compact RIO	0		0	0	1,0	0,1
Microcontrolador	0,5	1		0	2,5	0,25
Data logger	1	1	1		4,0	0,4
				Suma	10,0	1

(Fuente: Propia)

De acuerdo a la ponderación realizada de acuerdo al criterio de la facilidad de programación, resulta:

- Data logger
- Microcontrolador y PLC
- Controlador Compac RIO

Versatilidad con los instrumentos

Tabla 2.19 Ponderación de controladores según la versatilidad con los instrumentos

Microcontrolador = PLC > Compact RIO > Data logger
--

Versatilidad	PLC	Compact RIO	Microcontrolador	Data logger	$\Sigma+1$	Ponderación
PLC		1	0,5	1	3,5	0,35
Compact RIO	0		0	1	2,0	0,2
Microcontrolador	0,5	1		1	3,5	0,35
Data logger	0	0	0		1,0	0,1
				Suma	10,0	1

(Fuente: Propia)

De acuerdo a la ponderación realizada con respecto a su versatilidad con los instrumentos, el orden resulta ser:

- Microcontrolador y PLC
- Compact RIO
- Data logger

Por consiguiente, se desarrolla la tabla de conclusiones para los controladores.

Tabla 2.20 Conclusiones para seleccionar el controlador

Conclusiones	Disponibilidad	Costo	Peso	Programación	Versatilidad	Σ	Prioridad
PLC	0,10	0,053	0,04	0,025	0,035	0,25	3
Compact RIO	0,03	0,027	0,02	0,010	0,020	0,11	4
Microcontrolador	0,10	0,107	0,07	0,025	0,035	0,34	1
Data logger	0,10	0,080	0,07	0,040	0,010	0,30	2

(Fuente: Propia)

Con base en la tabla de conclusiones, el orden de prioridad para los controladores resulta ser el siguiente:

- Microcontrolador
- Data logger
- PLC
- Controlador Compact RIO

Al tener el microcontrolador como primera opción, se asocia en primera instancia utilizar el microcontrolador de marca Arduino Mega 2560 para el diseño conceptual del prototipo. Esta decisión se toma considerando que Arduino es una de las plataformas más referentes en microcontroladores, y conseguir una de estos es más factible.

Finamente, el prototipo constará de los siguientes instrumentos principales:

- Sensor de temperatura: Termopar Tipo K

- Controlador: Microcontrolador Arduino Mega 2560

Además, el prototipo consta de accesorios complementarios como:

- Módulo MAX6675
- Módulo MAX31855
- Protoboard
- Conectores de termopar hembra y macho.
- Cinta aislante termo fundible
- Cable USB tipo B
- Conectores macho – hembra
- Conectores macho – macho

Este es un inicio del prototipo conceptual. La estructura del equipo final se explica en la sección de diseño del prototipo, el cual contiene la distribución espacial de los instrumentos seleccionados y toda su integridad.

2.6. Selección del lenguaje y desarrollo del software

La presente sección abarca el procedimiento de selección del lenguaje de programación, la programación de la interfaz gráfica y el desarrollo de un archivo ejecutable para mostrar resultados de propiedades y diagramas termodinámicos de diferentes refrigerantes utilizados en los ciclos de refrigeración. Además, la sección contiene ejemplos de cálculo para obtener los distintos resultados mostrados en la interfaz gráfica.

2.6.1. Selección del lenguaje de programación

Actualmente, existen tres tipos de programación predominantes [49]:

- Lenguaje máquina
- Lenguaje de programación de bajo nivel
- Lenguaje de programación de alto nivel.

De los tres tipos de lenguajes mencionados, el lenguaje de programación a usarse en el proyecto es de alto nivel, puesto que se usa para crear lo que hoy en día son las páginas web, aplicaciones, entre otros. Se diferencia en gran parte de los otros lenguajes de programación, ya que su lenguaje tiene una estructura similar a la de los humanos, usando palabras en el inglés [49].

Este lenguaje de nivel avanzado es el más desarrollado, pues existe gran cantidad de programas que pueden incluir diferentes tipos de programación. Por mencionar los tipos de lenguaje más usados son [49]:

- Java
- C++
- C
- C#
- Python
- Visual basic.NET

- Lenguaje de programación R
- SQL
- Etc.

Dentro de la programación existen los entornos de desarrollo integrado (IDE), los cuales son configurados para programar uno o más de estos lenguajes. Con relación a los IDE que permiten realizar la programación de algunos de estos lenguajes son [50]:

- Pycharm para lenguaje de programación Python.
- NetBeans para lenguaje de programación Java.
- Code para lenguaje de programación C.
- Visual Studio para lenguaje de programación C++.

Muchos de los IDE tienen complementos de autocompletado e interpretación inteligente, como también, son capaces de transformar códigos de programación a otros lenguajes. Debido a la versatilidad entre los entornos, se puede seleccionar cualquiera de estos, tomando en cuenta el lenguaje de programación con el que se va a trabajar y la compatibilidad con las librerías requeridas por el desarrollador del programa.

Bajo esta consideración, el lenguaje de programación a utilizar será Python. Se define este lenguaje, considerando la información existente en el internet para crear interfaces gráficas con procesamiento de datos, su gran versatilidad y por ser un software libre.

2.6.2. Librerías en Python

Python, por defecto al instalarse, tiene incluido una lista reducida de librerías, y esta puede ampliarse dependiendo las necesidades o requerimientos de los proyectos. El objetivo de las librerías es ayudar a efectuar tareas de manera más sencilla, pues estas son definidas individualmente por un conjunto de funciones que cumplan el afín. Dentro de las librerías creadas, las necesarias para el desarrollo del proyecto son [43]:

- **NumPy.**- Desarrollada para cálculo numérico de alto nivel y análisis de datos.
- **Matplotlib.**- Desarrollada para mostrar imágenes estáticas, o dinámicas.
- **Os.**- Desarrollada para funcionalidades con el sistema operativo
- **Signal.**- Desarrollada para gestores de señal
- **Threading.**- Desarrollada para interfaces de hilado multinivel
- **Time.**- Desarrollada para funcionalidades con el tiempo.
- **Coolprop.**- Desarrollada para el cálculo de propiedades termodinámicas de fluidos.
- **Fluprodia.**- Desarrollada para crear gráficos termodinámicos provenientes de cálculos en Coolprop.
- **Tkinter.**- Desarrollada para crear interfaces gráficas de usuario (GUI)
- **Pyinstaller.**- Desarrollado para crear archivos ejecutables (.exe)

Es importante mencionar que muchas de las librerías enlistadas, contienen en su programación otras librerías dependientes, las cuales al instalarse mediante el *comand window*, se descargan automáticamente. Para comprensión del lector y como objetivo del proyecto, se detalla el uso de las librerías Coolprop, fluprodia, y tkinter puesto que estas son las más importantes para proyecto.

Uso de librería Coolprop en Python

El uso de la librería Coolprop en Python es muy sencilla. Para ello, se debe tener en cuenta tres condiciones:

- Propiedad del fluido deseada a encontrar
- Dos propiedades intensivas independientes
- Nombre del fluido

Estas condiciones son programadas según una estructura establecida por el Coolprop.

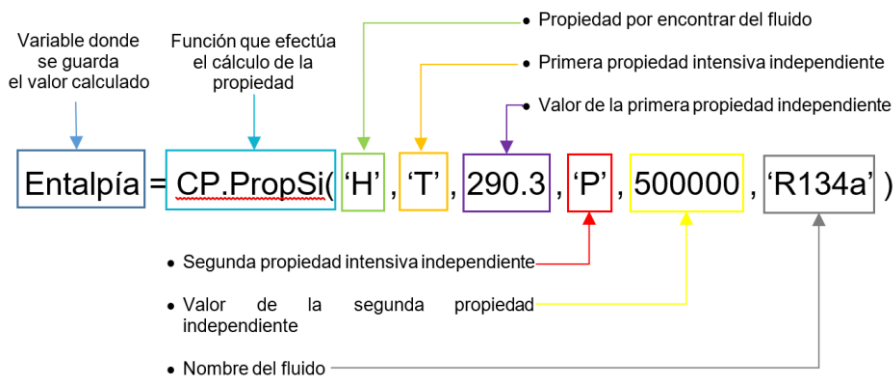


Figura 2. 35 Programación para el cálculo de propiedades con Coolprop
(Fuente: Propia)

La Figura 2. 35 es un ejemplo de programación para obtener la propiedad de entalpía del refrigerante R134a, a una temperatura de 290.3 K y una presión de 500000 Pa.

Hay que resaltar el sistema de unidades en el que se deben ingresar las propiedades independientes y en el que se obtienen los resultados. Por ende, se definen las propiedades que se utilizarán para el desarrollo del proyecto, siendo las siguientes:

- Presión en pascales [Pa]
- Temperatura en grados kelvin [K]
- Entalpía en joule por kilogramo [J/kg]
- Entropía en joule por kilogramo – kelvin [J/kg.K]

Es evidente que, para obtener resultados en otro sistema de unidades, se tendrán que realizar transformaciones a estos. Esta transformación no es una limitante para el desarrollo del proyecto, pues, mediante programación en Python, se cubre esta situación.

Uso de librería Fluprodia en Python

Fluprodia es una librería que permite crear diagramas termodinámicos para fluidos contenidos en Coolprop. Entre las ventajas con respecto a los propios gráficos desarrollados con el Coolprop, es la facilidad de dibujar líneas independientes con respecto a una única propiedad, estableciendo un inicio y final de esta. A diferencia de Coolprop que

no tiene una función definida para graficar líneas individuales, sino, solo grafica ciclos completos y estos no son asociados a ciclos reales.

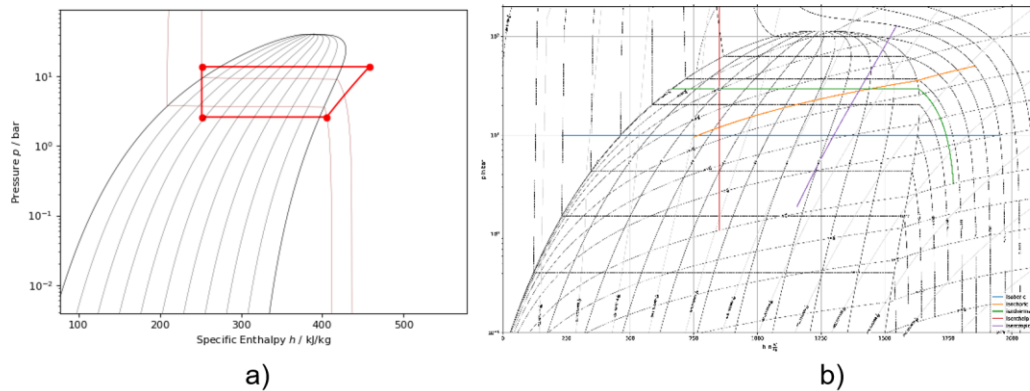


Figura 2. 36 a) Diagrama P-h realizado en Coolprop, b) Diagrama P-h realizado en Fluprodia
(Fuente: Propia)

Otra diferencia es el nivel de programación para obtener este tipo de gráficas. Fluprodia tiene ejemplos de programación que permiten entenderse fácilmente y pueden trasladarse a otras propiedades de fluidos. Esto no es posible con Coolprop, puesto que, en la página oficial de la librería, se ejemplifica un script o lenguaje de programación sin tener mucha información que pueda entenderse.

Uso de librería Tkinter en Python

Python tiene dos bibliotecas principales para realizar interfaces gráficas de usuario (GUI), Tkinter y PyQt5. Ambas son similares en la programación y la diferencia radica en que PyQt5 tiene el programa Qt designer, el cual permite crear la interfaz gráfica de manera visual y convertirla en código de lenguaje Python. Bajo criterio personal, se ha visto que usar Tkinter facilita el entendimiento paso a paso de la creación de widgets y la configuración cada uno de estos, a diferencia de PyQt5 el cual genera el widget de una manera automática, pero es difícil entender cada configuración contenida en la programación.

Considerando a Tkinter como la biblioteca elegida para crear la GUI, los comandos que más se utilizaron en la programación del presente trabajo son los siguientes [51]:

- FrameLabel.- Es un es widget que contiene un marco de etiqueta y permite espaciar las ventanas.
- Label.- Es una etiqueta de texto o imagen estática que puede ser modificable en cualquier tiempo.
- Entry.- Es una caja de texto que puede recibir datos de entrada o mostrar respuestas de texto.
- Combobox.- Es un widget que contiene opciones las cuales se presentan mediante una lista despegable
- Button.- Es un widget que permite ejecutar una acción al presionarse

- Scale.- Permite definir un número en un rango de valores, mediante uso de un control deslizante
- Checkbutton.- Es una casilla de verificación
- Message.- Permite mostrar al usuario un texto programado, el cual no puede ser modificable.

Se ha hecho énfasis en explicar el uso de estas bibliotecas, teniendo en cuenta que van a ser las fundamentales para llegar a conseguir los resultados propuestos en la metodología y los objetivos específicos del presente proyecto.

2.6.3. Desarrollo del software

Para desarrollar el software final del proyecto, se han escalado diferentes etapas de programación, considerando las siguientes:

- Programación en Arduino
- Programación para comunicación serial Arduino – Python y procesamiento de datos
- Programación para cálculo de propiedades termodinámicas mediante Coolprop
- Programación de ecuaciones para cálculo de calores, trabajo y COP.
- Programación para el procesamiento de imágenes con Fluprodia
- Programación de la interfaz gráfica
- Programación para obtener archivo ejecutable

A fin de no alargar la explicación paso a paso de toda la programación, se comentará las partes más importantes realizadas en cada etapa de programación.

Programación en Arduino

De manera similar a Python, Arduino cuenta con un paquete de librerías para diferentes disciplinas e instrumentos, entre las cuales encontramos librerías para transferir datos a través de los módulos MAX6675 y MAX31855. El IDE de Arduino se divide en 2 secciones:

- Void setup()
- Void loop()

El Void Setup es el que se ejecuta una sola vez al iniciar cualquier programa en la placa de Arduino para posteriormente pasar al Void Loop, el cual es un bucle infinito. No obstante, previo a estas dos secciones el entorno permite importar librerías y declarar variables sin que estas se ejecuten con el inicio del programa.

La metodología de programación en el IDE de Arduino se muestra en la Figura 2. 37:

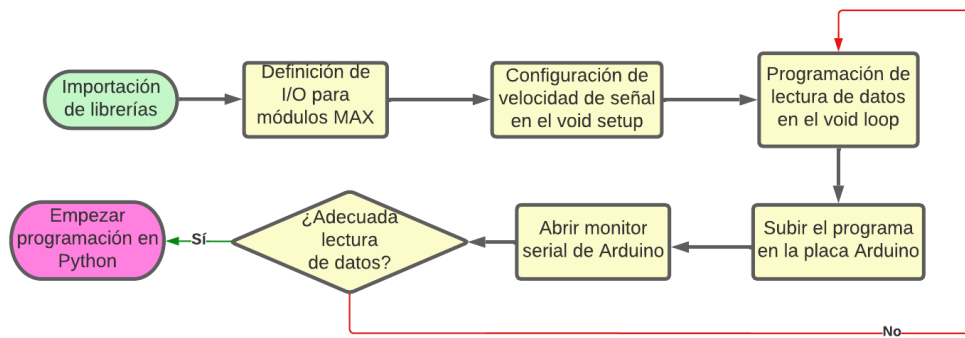


Figura 2. 37 Metodología para la programación en el IDE de Arduino
(Fuente: Propia)

La programación en el IDE de Arduino es sencilla a criterio propio y la misma se lo ha realizado basándose en información audiovisual encontrada en el internet.

Programación para comunicación serial Arduino – Python y procesamiento de datos

Para la selección del IDE de programación, se interactuó con diversos programas y se seleccionó Pycharm como el más idóneo para el desarrollo de la programación. Dentro de la programación, se realizó un apartado destinado a la lectura de datos. Para ello, se utilizó la librería *serial*, la cual permite transmitir datos entre Arduino y Python. Además, mantiene una comunicación estable con el microcontrolador. La Figura 2. 38 es un extracto de la programación realizada para la lectura de datos, usando programación con Tkinter.

<code>import serial</code>	←	Importar librería
<code>self.port = self.clicked com.get()</code>	←	Define Puerto COM de conexión
<code>self.baud = self.clicked bd.get()</code>	←	Define velocidad de conexión
<code>self.ser = self.serial.Serial(self.port, self.baud)</code>	←	Ejecuta la función serial con velocidad y puerto definidas
<code>while self.serialData:</code>	←	Ejecuta un bucle infinito para leer los datos
<code>if self.ser.inWaiting() > 0:</code>	←	Condición para leer datos mientras esté activado
<code>self.sensor = self.ser.readline()</code> <code>self.r = self.sensor.splitlines()</code>	←	Lectura de datos

Figura 2. 38 Programación para lectura de datos entre Arduino y Python
(Fuente: Propia)

La lectura de datos extraída desde Arduino es en un formato diferente al requerido para programar con Python (Figura 2. 39).

```

"C:\Program Files\Python38\python.exe" C
[b'20.00,20.50,19.75,20.25,20.50,20.25']
[b'20.00,20.25,20.50,20.50,20.50,20.25']
  
```

Figura 2. 39 Datos obtenidos de Arduino usando Python

(Fuente: Propia)

Los signos y símbolos innecesarios son eliminados mediante programación, obteniendo datos de tipo *string*, mismos que se guardan en una lista general que se actualiza en cada ciclo de lectura.

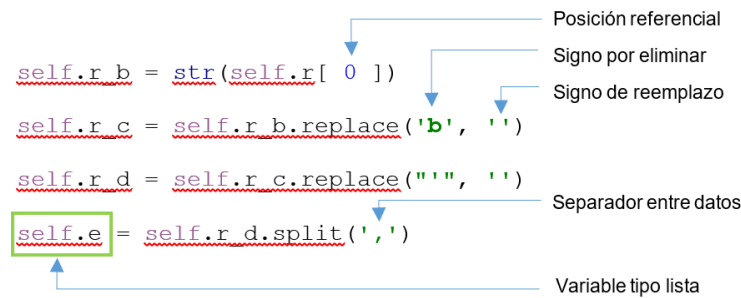


Figura 2. 40 Programación para eliminar signos y símbolos innecesarios

(Fuente: Propia)

Al ejecutar la programación de la Figura 2. 40, los datos obtenidos pueden utilizarse en Python.

```
['21.25', '20.75', '20.00', '20.50', '20.75', '20.50']
['20.75', '20.50', '20.25', '20.50', '20.75', '20.50']
['21.00', '20.50', '20.25', '20.50', '20.75', '20.50']
```

Figura 2. 41 Datos de temperatura enlistados para el uso en Python

(Fuente: Propia)

Los datos procesados son asignados de manera individual a un variable de temperatura según el estado correspondiente (1 al 6, de izquierda a derecha según Figura 2. 41) para utilizarse en la programación con Coolprop.

Programación para cálculo de propiedades termodinámicas mediante Coolprop

Previamente, se explicó la estructura de programación mediante uso de la librería Coolprop. Además, se mencionó que esta librería calcula diferentes propiedades del fluido y entre las de interés para el estudio son:

- Temperatura
- Presión
- Entalpía
- Entropía

Al definirse los seis puntos para medir la temperatura, hay que identificar si algunos de los estados tienen dos propiedades intensivas independientes completamente definidas, para posteriormente calcular los estados restantes.

Del diagrama T - s para un ciclo de refrigeración real (Figura 2. 34), los estados 3 y 6 están definidos por dos propiedades independientes (calidad y temperatura del refrigerante).

Mediante uso de Coolprop, se calculan las propiedades del estado como se muestra en la Figura 2. 42:

```
##### Cálculo de estados #####
##### Cálculo estado 3 #####

self.P3 = float(CP.PropsSI('P', 'T', self.T3, 'Q', 0, self.fluid name))
self.H3 = float(CP.PropsSI('H', 'T', self.T3, 'Q', 0, self.fluid name))
self.S3 = float(CP.PropsSI('S', 'T', self.T3, 'Q', 0, self.fluid name))

P_3.append(self.P3)
H_3.append(self.H3)
S_3.append(self.S3)
```

Figura 2. 42 Cálculo de propiedades en el estado 3 del refrigerante

(Fuente: Propia)

En la Figura 2. 42, se observa que, las variables están definidas con respecto al estado en que se encuentra y la propiedad que se desea obtener (estado 3: P3 → Presión, H3 → Entalpía, S3 → Entropía). Los resultados son almacenados continuamente en una lista independiente de cada propiedad.

Al almacenar los datos en una lista individual por propiedad, mediante programación se obtiene el último valor agregado, siendo este el valor actual de medición de cada propiedad. Similar a la programación en la Figura 2. 42, se realiza la programación para el estado 6, teniendo en cuenta que la calidad del refrigerante es de gas saturado (Q=1).

Siguiendo la misma estructura de programación en los estados 3 y 6, se calcula los estados restantes. A manera de ejemplo, se presenta la programación para el estado 1 en la Figura 2. 43.

```
##### Cálculo estado 1 #####

self.P1 = self.P6
self.H1 = float(CP.PropsSI('H', 'T', self.T1, 'P', self.P1, self.fluid name))
self.S1 = float(CP.PropsSI('S', 'T', self.T1, 'P', self.P1, self.fluid name))

P_1.append(self.P1)
H_1.append(self.H1)
S_1.append(self.S1)
```

Figura 2. 43 Cálculo de propiedades en el estado 1 del refrigerante

(Fuente: Propia)

La programación se realiza para tres tipos de refrigerantes, los cuales son:

- R600a o Isobutano
- R134a
- R290 o propano

Según Coolprop, los resultados pueden calcularse para tres sistemas de unidades:

- EUR: (°C, bar, kJ)
- SI: (K, kPa, kJ)
- KSI: (K, Pa, J)

Los cálculos con Coolprop para el presente proyecto, no van más allá de los ejemplos de programación mostrados previamente, siendo sencillos y de fácil entendimiento.

Programación de ecuaciones para cálculo de calores, trabajo y COP.

El cálculo de calores de entrada y salida del sistema, el trabajo requerido del proceso, y como resultante el COP, son diferentes para los casos ideal y real. Por una parte, para el caso ideal según el diagrama T - s del ciclo de refrigeración real (Figura 2. 34), se considera los puntos 3 y 6 como referencia del proceso, teniendo por consecuencia el diagrama ideal de la Figura 2. 44.

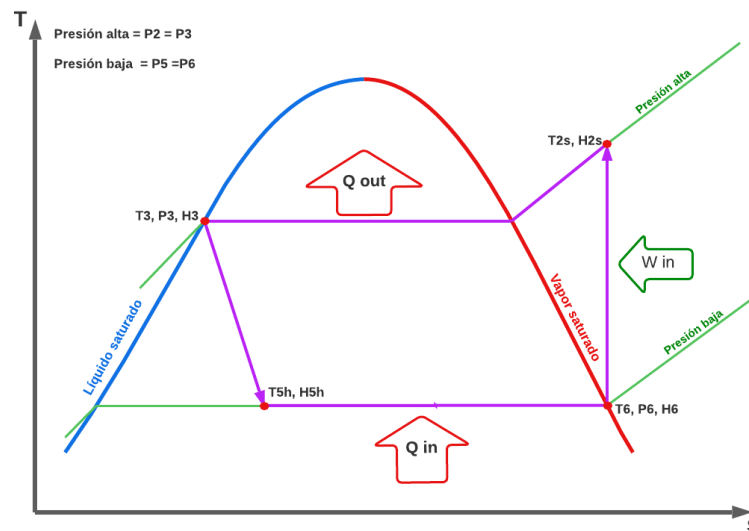


Figura 2. 44 Diagrama T – s del ciclo ideal de refrigeración con dos estados
(Fuente: Propia)

De acuerdo al diagrama T-s del ciclo ideal, los procesos intervinientes son calculados según las ecuaciones (1), (2), (6) y (7) previamente definidas. Para ello, se realiza la programación en Python como se muestra en la Figura 2. 45.

```
##### Cálculo de resultados ideales #####
##### Cálculo q in ideal #####

self.r_q_in_ideal = abs(float(self.H6 - self.H5_ideal))
C_q_in_ideal.append(self.r_q_in_ideal)

##### Cálculo q out ideal #####

self.r_q_out_ideal = abs(float(self.H2_ideal - self.H3))
C_q_out_ideal.append(self.r_q_out_ideal)

##### Cálculo w in ideal #####

self.r_w_in_ideal = abs(float(self.H2_ideal) - float(self.H6))
C_w_in_ideal.append(self.r_w_in_ideal)

##### Cálculo COP ideal #####

self.r_cop_ideal = abs(self.r_q_in_ideal / self.r_w_in_ideal)
C_cop_ideal.append(self.r_cop_ideal)
```

Figura 2. 45 Programación de ecuaciones para resultados ideales del sistema
(Fuente: Propia)

La programación de la Figura 2. 45, es equivalente a cada ecuación mencionada para calor de entrada, calor de salida, trabajo y COP, el único detalle es que los resultados están por kilogramo de refrigerante. Esto se debe a que no es posible determinar el flujo másico del refrigerante, en cada punto donde se realiza las medidas.

Por otra parte, para el diagrama T – s real, este resulta de 6 estados definidos en secciones anteriores, como consecuencia de pruebas experimentales realizadas.

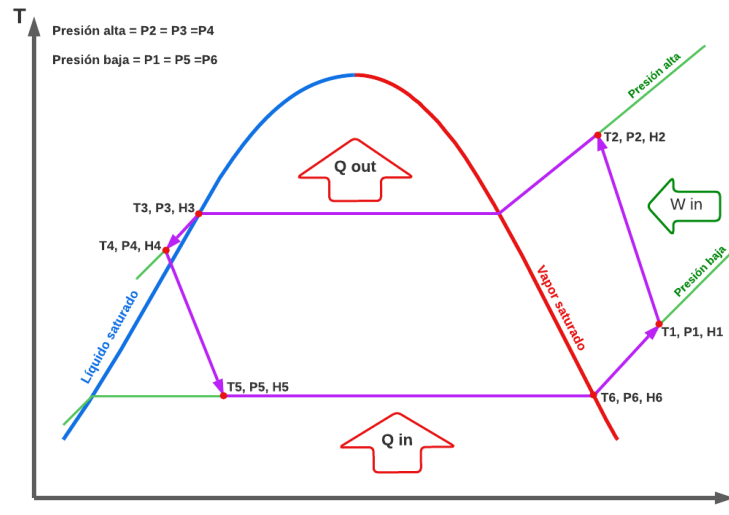


Figura 2. 46 Diagrama T - s real del ciclo de refrigeración con seis estados
(Fuente: Propia)

El ciclo real consta de arreglos en el sistema que permiten aumentar el COP y también mantienen la seguridad de los componentes. Entre estos arreglos, se encuentra el subenfriamiento, recalentamiento y pérdida de calor en la expansión. Estos arreglos tienen influencia en el ciclo, puesto que el sistema puede llegar a superar el COP del ciclo ideal.

Considerando un ciclo real en el que inicialmente cuente con un subenfriamiento, el diagrama T – s queda representado según la Figura 2. 47:

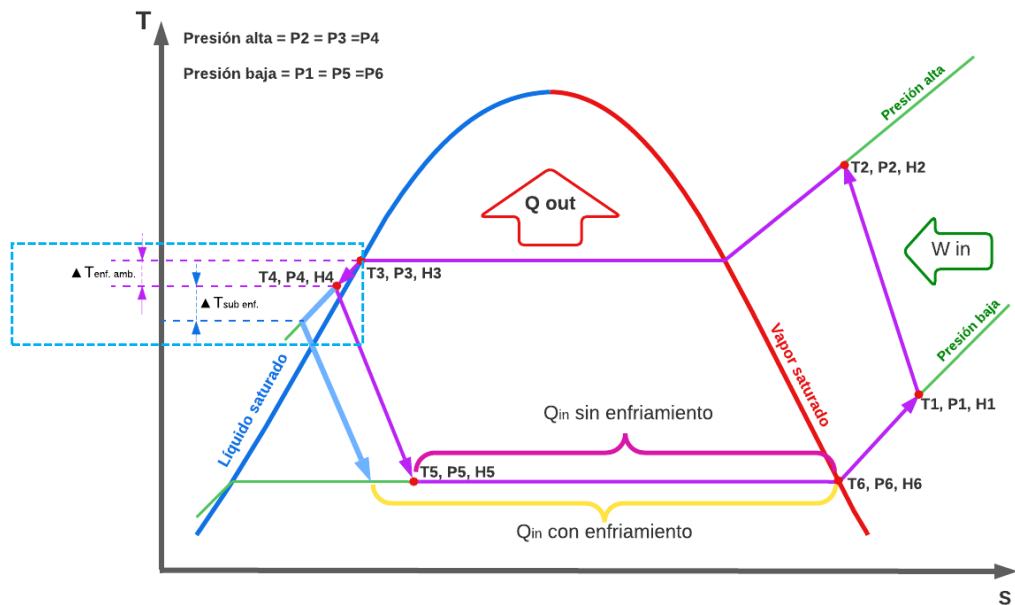


Figura 2. 47 Diagrama T – s de un ciclo de refrigeración real con enfriamiento
(Fuente: Propia)

En la Figura 2. 47 existen dos enfriamientos, por la temperatura ambiente y por existencia de intercambiadores de calor en la expansión, los cuales producen un subenfriamiento. El enfriamiento hace que el calor de entrada aumente debido a que, al bajar la temperatura del fluido, la entalpía se reduce haciendo que el evaporador tenga mayor capacidad de absorber calor.

Por otra parte, la temperatura de recalentamiento está comprendida entre los puntos 1 y 6 del diagrama T-s real. Sin embargo, este recalentamiento involucra dos procesos [52]:

- Recalentamiento útil.- Resultado de la ganancia de calor entre la temperatura dentro de la cámara de refrigeración y la temperatura alcanzada por el refrigerante al encontrarse como gas saturado.
- Recalentamiento en absorción.- Resultado de la ganancia de calor de la temperatura a la entrada del compresor y la temperatura a la salida del evaporador. En esta ganancia de calor tiene influencia la temperatura ambiente.

De estos dos recalentamientos, el recalentamiento útil es el que mejora las capacidades del sistema. En cambio, el recalentamiento de absorción no afecta el desempeño del ciclo porque es una ganancia de calor fuera del evaporador. El diagrama T – s real con recalentamiento y subenfriamiento se muestra en la Figura 2. 48:

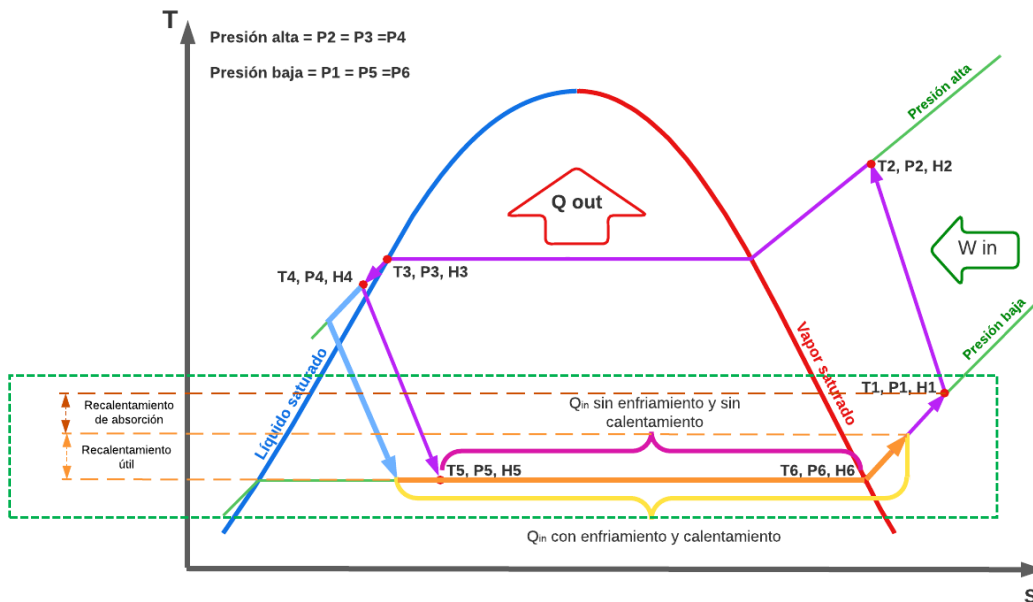


Figura 2. 48 Diagrama T – s del ciclo real de refrigeración con subenfriamiento y recalentamiento (Fuente: Propia)

Al aumentar la temperatura a la salida del evaporador, aumenta la capacidad de calor de entrada y a su vez aumenta el COP debido a que este es directamente proporcional.

Otro arreglo que se encuentra en los equipos de refrigeración, son los intercambiadores de calor. Aquí pueden existir más de dos arreglos de diferentes configuraciones. La transferencia de calor puede ser por conducción de calor entre paredes de las tuberías o en contraflujo mediante arreglo de tubos concéntricos.

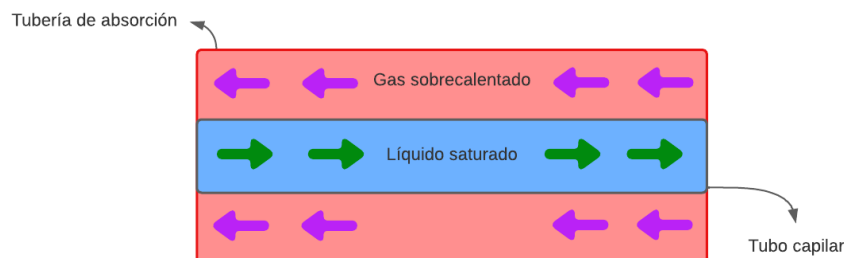


Figura 2. 49 Dirección del fluido entre el tubo capilar y el tubo de absorción (Fuente: Propia)

De acuerdo al caso de estudio, el proceso de intercambio de energía se realiza en el proceso de expansión. El tubo capilar, previo a ser insertado dentro del tubo de absorción, alcanza una temperatura aproximada de 34 °C. En el evaporador, la temperatura máxima a la que se encuentra el refrigerante es -27 °C. Como la transferencia de calor es del cuerpo caliente al cuerpo frío, la transferencia de calor se produce del tubo capilar al tubo de absorción, según la Figura 2. 50.

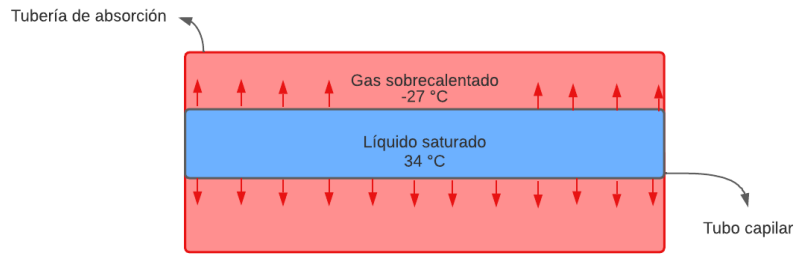


Figura 2. 50 Transferencia de calor entre el tubo capilar y el tubo de absorción
(Fuente: Propia)

El proceso de expansión no se realiza a entalpía constante, puesto que el tubo capilar transfiere energía al tubo de absorción. Por otra parte, la energía perdida no se puede determinar de manera experimental, puesto que esto implicaría romper las tuberías y medir la temperatura a lo largo de todo el arreglo. Sin embargo, considerando la geometría del intercambiador de calor, se hace una suposición de pérdida de energía en la expansión.

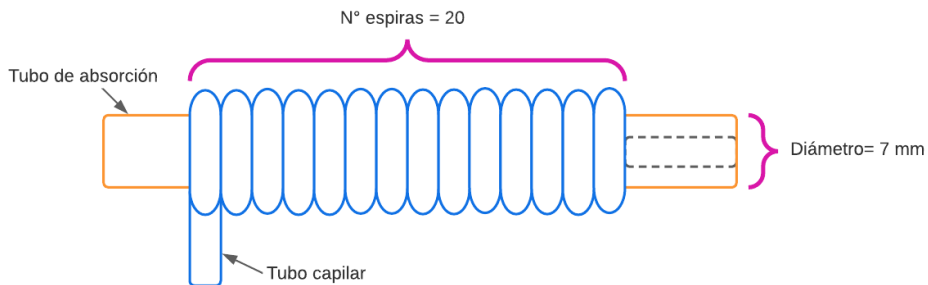


Figura 2. 51 Geometría del intercambiador de calor entre tubo capilar y tubo de absorción
(Fuente: Propia)

La longitud enrollada usando fórmulas geométricas es:

- Perímetro en una vuelta de espira:

$$p = \pi \cdot \phi = \pi \cdot 7 \text{ mm} = 21.99 \text{ mm} \approx 30 \text{ mm/espira}$$

- Longitud total enrollada:

$$L = N^{\circ} \text{espiras} * p = 20 \text{ espiras} * 30 \left[\frac{\text{mm}}{\text{espira}} \right] = 600 \text{ mm}$$

La longitud total enrollada es de 600 mm. Por otra parte, en el intercambiador de calor la temperatura del refrigerante en el tubo de absorción aumenta de 27.75 °C a 29.29 °C, esto quiere decir que aumenta 1.5 °C. La energía transferida con respecto a la diferencia de temperatura se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$q_{\text{perdida}} = c_p \cdot \Delta T \quad (8)$$

Donde:

c_p : Calor específico del gas a presión constante [kJ/kg.K]

ΔT : Diferencia de temperatura en el gas [K]

El valor del calor específico para los diferentes refrigerantes es extraído de la tabla A-2 del libro de Yunes Cengel [45]. El desarrollo de la ecuación (8) para el refrigerante R600a resulta:

$$q_{perdida} = 1.7164 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] * 1.5 [K] = 2.5746 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Para el caso del refrigerante R600a, se relaciona que cada 600 milímetros de tubo capilar se pierden 2.5746 [kJ/kg]. Asumiendo la misma diferencia de temperatura de 1.5 °C, se determina la pérdida de calor en el dispositivo de expansión para los refrigerantes R134a y R290. Como resultado se tiene que en 600 milímetros de longitud se produce una pérdida de energía en la expansión de 1.1145 [kJ/kg] y 2.5191 [kJ/kg], respectivamente para cada refrigerante. Para referenciar los valores de manera general, se calcula la pérdida de energía por metro de longitud para cada refrigerante:

- R600a: 4.291 [kJ/kg.m]
- R134a: 1.8575 [kJ/kg.m]
- R290: 4.1985 [kJ/kg.m].

Este supuesto de pérdida de energía en el dispositivo de expansión, es necesario explicarlo considerando que es un proceso que mejora el COP del sistema.

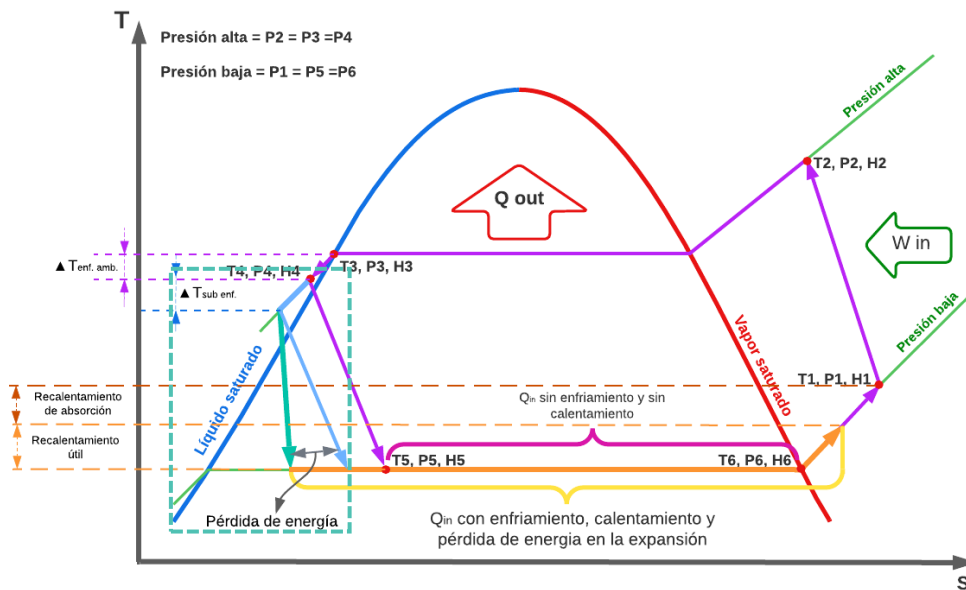


Figura 2. 52 Diagrama T – s del ciclo real de refrigeración con enfriamiento, recalentamiento y pérdida de energía.

(Fuente: Propia)

La Figura 2. 52, muestra que el proceso de expansión, al tener pérdida de energía, no se realiza a entalpía constante. La pérdida de energía hace que el estado final de expansión (estado 5), tenga una menor entalpía, aumentando el calor de entrada y mejorando el COP. Considerando la importancia de estos arreglos a los ciclos de refrigeración, la

programación se realiza dependiendo al estado al que influye la variación de estas condiciones (Figura 2. 53).

```
##### Subenfriamiento y recalentamiento #####
self.T4 = float(self.f4 + 273 + self.Temperatura_Subenfriamiento)

self.T6_rec = float(self.f6 + 273 + self.Temperatura_Recalentamiento)

##### Pérdida de energía #####
self.H5 = self.H4 - self.Energia_perdida * 1000
```

Figura 2. 53 Programación en Python para arreglos de subenfriamiento, recalentamiento y pérdida de energía

(Fuente: Propia)

La configuración de estos arreglos en la interfaz gráfica es a consideración del usuario. No obstante, para cada caso se recomienda usar los siguientes valores referenciales:

- Temperatura de subenfriamiento: 9 °C a 12 °C [21]
- Temperatura de recalentamiento: 3 °C a 7 °C [21]
- Pérdida de energía en la expansión: Depende del refrigerante y es una aproximación realizada experimentalmente. Para R600a es 4.291 [kJ/kg.m], R134a es 1.8575 [kJ/kg.m], R290 es 4.1985 [kJ/kg.m].

Estas aproximaciones permiten ajustar los resultados a un proceso real, tomando en cuenta que los sensores no tienen contacto directo con el refrigerante, y esto produce un error de resultados. Además, las suposiciones son conservativas y basadas en fundamentos de termodinámica.

Por otra parte, previo a la programación para determinar los resultados de la compresión politrópica, se realiza un análisis trigonométrico con el fin de determinar el valor del coeficiente politrópico “n”. El análisis se estructura de la siguiente manera, tomando en cuenta el estado inicial de compresión (estado 1), se calcula la compresión para el proceso isentrópico e isotérmico. Esto gráficamente se muestra en la Figura 2. 54.

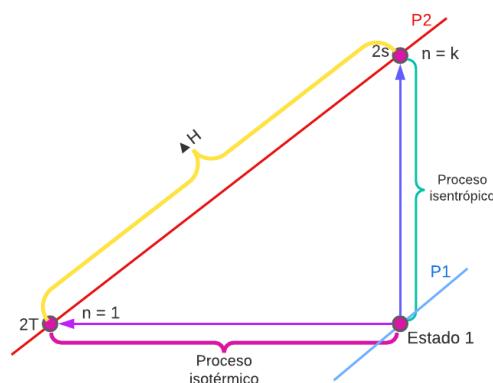


Figura 2. 54 Proceso de compresión isotérmica e isentrópica

(Fuente: Propia)

La Figura 2. 54 relaciona el proceso isotérmico e isentrópico, sin considerar el proceso politrópico. Los estados finales de cada proceso producen una diferencia de entalpía y la unión de cada punto, grafican un triángulo rectángulo. Para el proceso politrópico, el estado inicial (estado 1) y final (estado 2) están completamente definidos.

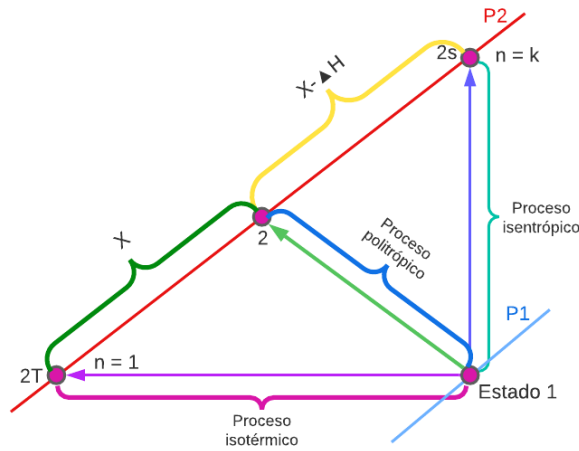


Figura 2. 55 Proceso de compresión politrópica
(Fuente: Propia)

Como se puede observar en la Figura 2. 55, el proceso politrópico se encuentra entre el proceso isotérmico e isentrópico. El proceso politrópico está compuesto por la sumatoria de calor y trabajo de compresión politrópica. Esta compresión politrópica está relacionada con un coeficiente politrópico entre $1 < n < k$. Para determinar el valor del coeficiente “n”, se relacionan la entalpía; propiedad conocida, de los estados finales para cada proceso. Esto linealmente es representado de la siguiente manera.

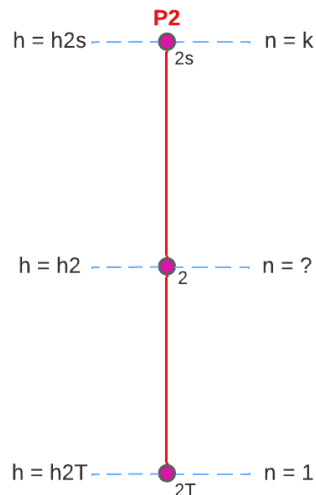


Figura 2. 56 Linealización de estados para los diferentes casos de compresión
(Fuente: Propia)

Al linealizar los estados finales de compresión (Figura 2. 56), el coeficiente politrópico se calcula mediante interpolación, teniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{n-1}{k-1} = \frac{h_2 - h_{2T}}{h_{2s} - h_{2T}} \quad (9)$$

Desarrollando la ecuación (9):

$$n = \frac{h_2 - h_{2T}}{h_{2s} - h_{2T}} \cdot (k-1) + 1 \quad (10)$$

Donde:

n : Coeficiente politrópico

h_2 : Entalpía en el estado 2 [kJ/kg]

h_{2T} : Entalpía en el estado 2 isotérmico [kJ/kg]

h_{2s} : Entalpía en el estado 2 isentrópico [kJ/kg]

k : Coeficiente isentrópico

Mediante programación en Python, el coeficiente politrópico es encontrado automáticamente aplicando la ecuación (10). Además, con el coeficiente politrópico se realiza la programación del trabajo real del ciclo, según la ecuación (5). Todo este proceso se ejemplifica para el refrigerante R600a en la Figura 2. 57:

```
##### Cálculo entalpia en compresión isentrópica #####
self.H2_s = float(CP.PropsSI('H', 'S', self.S1, 'P', self.P3, self.fluid_name))
self.W_isentropico = abs(self.H2_s - self.H1)
C_w_isentropico.append(self.W_isentropico)

##### Cálculo entalpia en compresión isotérmica #####
self.H2_T = float(CP.PropsSI('H', 'T', self.T1, 'P', self.P3, self.fluid_name))

##### Constante k para R600a #####
self.k_R600a = 1.0915

##### Cálculo del coeficiente politrópico "n" para compresión real #####
self.n_politropico = (self.k_R600a - 1) * ((self.H2 - self.H2_T) / (self.H2_s - self.H2_T)) + 1

##### Constante R del refrigerante R600a #####
self.R_R600a = 143

##### Cálculo w_in real #####
self.r_w_in_real = (self.n_politropico * self.R_R600a * (self.T2 - self.T1)) / (self.n_politropico - 1)
C_w_in_real.append(self.r_w_in_real)

##### Cálculo COP real #####
self.r_cop_real = abs(self.r_q_in_real / self.r_w_in_real)
C_cop_real.append(self.r_cop_real)
```

Figura 2. 57 Programación en Python para cálculo de resultados reales del ciclo con refrigerante R600a.

(Fuente: Propia)

Como se ha mencionado, solo se ejemplifica la programación para el refrigerante R600a. Para los demás refrigerantes seleccionados se aplica el mismo principio de programación, cambiando el valor correspondiente de las constantes “k” y “R” de cada gas. Los valores de las constantes “k” y “R”, son extraídos de la tabla A – 2 del libro de Yunus Cengel [45].

Programación para el procesamiento de imágenes con Fluprodia

La programación de imágenes con Fluprodia, se ha realizado para tres casos:

- Imágenes para el ciclo ideal
- Imágenes para el ciclo real
- Imágenes para el ciclo ideal y real

De aquí también se deriva el procesamiento de imágenes según el sistema de unidades que se requiera visualizar, el refrigerante seleccionado, y el tipo de diagrama, sea este un P – h o T – s. La ventaja de utilizar esta librería es que, definiendo estados iniciales y finales de un proceso, este se grafica automáticamente.

```

if self.nombre_fluido == 'R600a':
    self.fluid name = 'Isobutane'
self.selec tipo diagrama = self.selec diagrama.get()
diagram = FluidPropertyDiagram(fluid=self.fluid name)
if self.Sistema_unidades == 'EUR':
    diagram.set unit system(T='°C', h='kJ/kg', p='bar', s='kJ/kgK')
diagram.calc_isolines()
data = {
    'isobaric': {
        'isoline_property': 'p',
        'isoline_value': self.P3 / 100000, # bar
        'starting_point_property': 'h',
        'starting_point_value': self.H2_ideal / 1000, # kJ/kg
        'ending_point_property': 'h',
        'ending_point_value': self.H3 / 1000 # kJ/kg
    }
},

```

Figura 2. 58 Configuración de estados iniciales y finales para proceso isobárico en el ciclo ideal (Fuente: Propia)

La programación es semejante para los demás procesos, considerando la o las propiedades más adecuadas. El resultado de la programación para los procesos en el ciclo ideal se muestra en la Figura 2. 59.

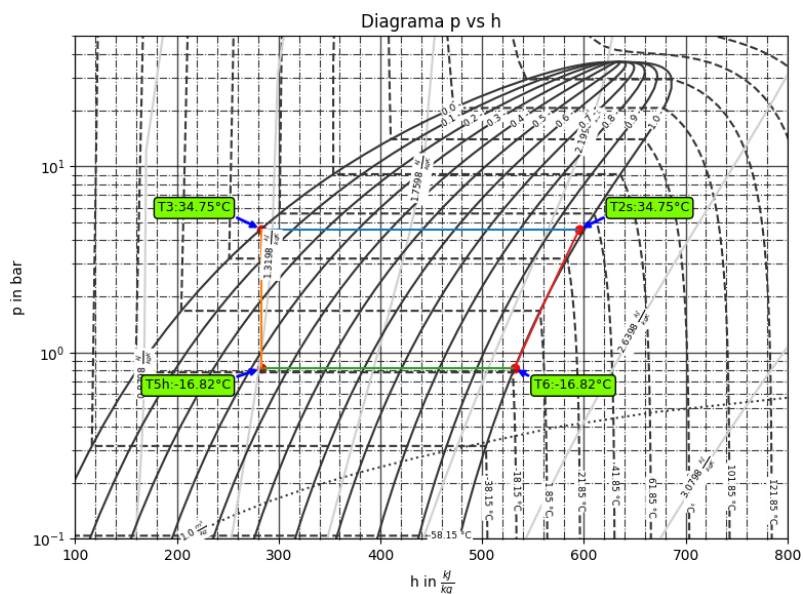


Figura 2. 59 Ciclo ideal de refrigeración usando Fluprodia (Fuente: Propia)

La programación presentada en la Figura 2. 58, ejecuta la línea de color celeste mostrada en la Figura 2. 59. La programación con Fluprodia tiene la desventaja que solamente puede configurarse para graficar seis procesos, los cuales son:

- isobaric: Proceso isobárico
- isochoric: Proceso isocórico
- isenthalpic: Proceso isentálpico
- isentropic: Proceso isentrópico
- isothermal: Proceso isotérmico
- isoquality: Proceso a calidad constante

Para un ciclo real, esta desventaja no es mayor inconveniente, ya que el ciclo real se ajusta a esta cantidad de procesos.

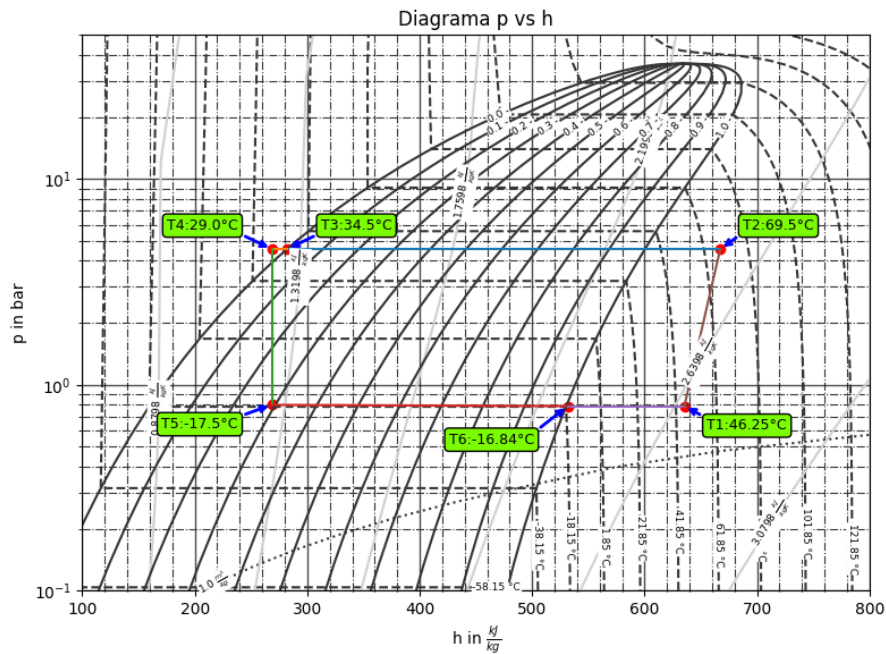


Figura 2. 60 Ciclo real de refrigeración usando Fluprodia
(Fuente: Propia)

Debido a la desventaja mencionada, si se requiere presentar una imagen donde se comparen los dos procesos, resulta insuficiente la cantidad de procesos permitidos para programar con la librería Fluprodia. Debido a esto, hay que recurrir a otras alternativas que permitan cumplir el requerimiento. Para ello, se hace uso de la función “annotate” de la librería “Matplotlib”, permitiendo esta función crear anotaciones posicionales, dentro de un diagrama configurado a una cierta escala.

```

##### Dibujo líneas ideales estado 3 - 5 - 6 con anotación #####
diagram.ax.annotate('',
xy=(float(self.H5_ideal / 1000), float(self.P6 / 100000)),
xytext=(float(self.H3 / 1000), float(self.P3 / 100000)),
xycoords='data',
textcoords='data',
size=9,
ha='left',
va='bottom',
arrowprops=dict(arrowstyle="-",
color='#FF00FF',
linewidth=2,
relpos=(0., 0.))
)

```

Figura 2. 61 Programación para crear línea individual del ciclo de refrigeración ideal entre los estados 3 y 5
(Fuente: Propia)

La Figura 2. 61 es un extracto de la programación realizada para complementar los procesos faltantes al presentar gráficamente el ciclo ideal y real de refrigeración. Figura 2. 62, muestra el resultado de la programación realizada para presentar ambos ciclos.

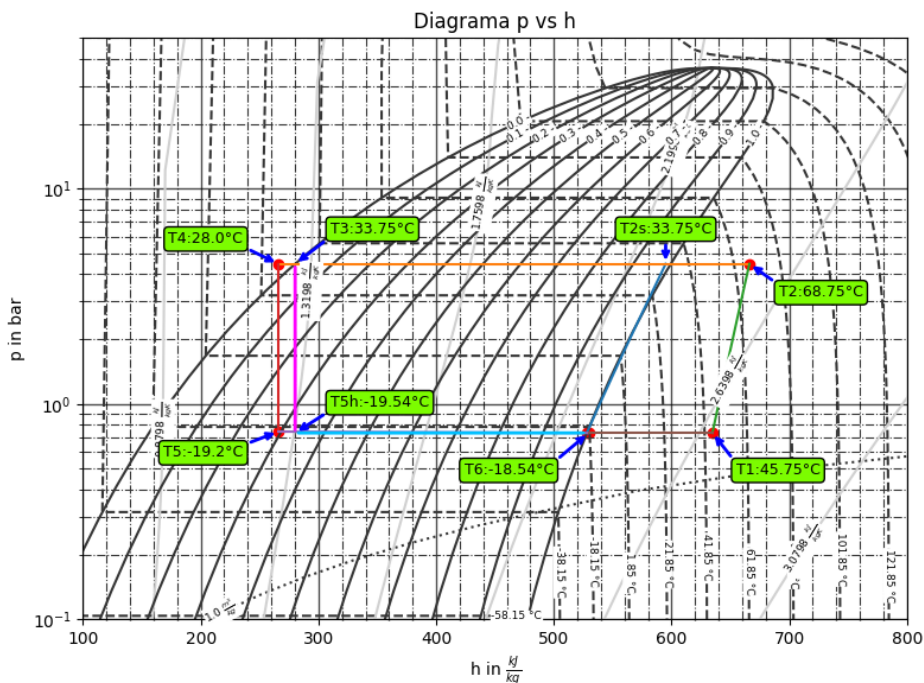


Figura 2. 62 Ciclo ideal y real de refrigeración usando Fluprodia
(Fuente: Propia)

Además de utilizar la función “annotate” para completar los procesos faltantes en el ciclo ideal y real, se usó esta función para crear las anotaciones de temperatura con su respectiva flecha indicativa de posición. Entre otras configuraciones realizadas dentro de la programación, fue la librería Fluprodia. Al código fuente de esta librería, se configuró el grosor de líneas primarias y secundarias, el tamaño de visualización de las etiquetas, la ubicación de estas, y el título del diagrama. Todo esto se realizó con la finalidad de obtener

las imágenes con la mejor visualización y la información necesaria, para la comprensión de los lectores.

Programación de la interfaz gráfica

En secciones anteriores se había mencionado que la librería para desarrollar la interfaz gráfica es Tkinter. Además, se mencionaron los comandos que más se implementaron en la elaboración de la interfaz gráfica, y la funcionalidad de cada uno de estos. Para ello, en primera instancia se presenta la ventana final del proyecto y su contenido.

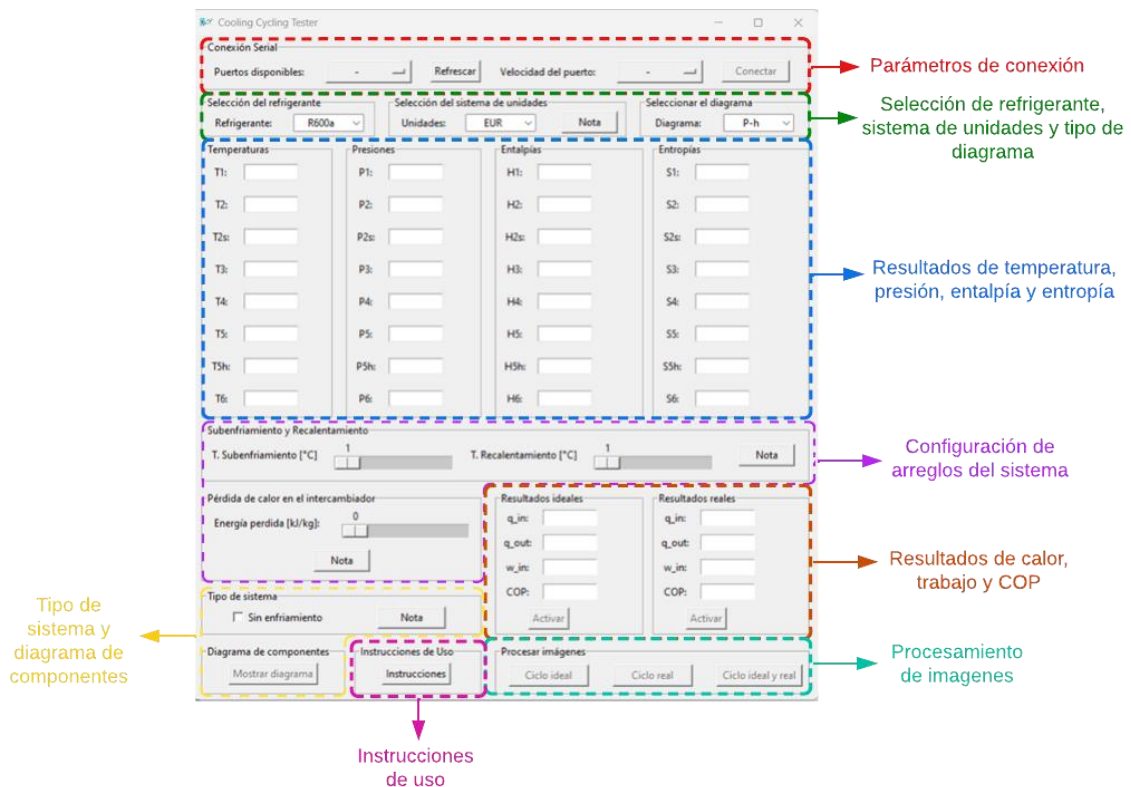


Figura 2. 63 Interfaz gráfica Cooling Cycle Tester (CCT)

(Fuente: Propia)

El tamaño de la ventana de la Figura 2. 63 es de 735 píxeles de ancho por 780 píxeles de alto, y se posiciona desde la parte superior izquierda de la ventana principal (coordenadas $x = 0, y = 0$).

```
def __init__(self, master=None):
    super().__init__(master, width=735, height=780)
    self.master = master
    self.master.geometry('+0+0')
    self.pack()
```

Annotations in the image:

- A red arrow points from the text 'Configuración de ancho y alto de ventana' to the `width=735, height=780` parameters in the `super().__init__` call.
- A green arrow points from the text 'Configuración de posición inicial de ventana' to the `self.master.geometry('+0+0')` line.

Figura 2. 64 Programación del tamaño y posicionamiento de la ventana

(Fuente: Propia)

Basándose en el tamaño de la ventana, se ajustaron las diferentes funciones enmarcadas de la interfaz gráfica (Figura 2. 63). De forma resumida se explica la funcionalidad de cada apartado:

- Parámetros de conexión: Este apartado está enmarcado con el título de conexión serial. La función de esta sección es seleccionar automáticamente el puerto COM de entrada donde está conectado el equipo y por consiguiente su velocidad de señal. Al estar seleccionados ambos parámetros, el programa activa el botón "Conectar", el cual permite iniciar el proceso de lectura de datos.
- Selección del refrigerante, sistema de unidades y del tipo de diagrama: Son agrupados los tres enmarcados, debido a que tienen asociado un listado de opciones, configurable para diferentes casos. Al seleccionar cualquier opción dentro de los apartados, esta se actualiza automáticamente en la interfaz.
- Temperaturas, presiones, entalpías y entropías: Son resultados de las propiedades del refrigerante según donde se encuentran posicionados los sensores de temperatura. Dentro de estos resultados, se encuentran las propiedades para el ciclo ideal.
- Subenfriamiento, recalentamiento y pérdida de energía en el intercambiador: Estos apartados permiten al usuario variar parámetros para diferentes condiciones de estudio, haciendo que los resultados se ajusten a un sistema real para cualquier caso de estudio similar.
- Resultados ideales y Resultados reales: Muestran valores numéricos de los procesos intervinientes en los ciclos de refrigeración. Dentro de estos se encuentran calores de entrada y salida, trabajo del compresor y coeficiente de desempeño. Cada resultado es independiente para el ciclo ideal y real.
- Tipo de Sistema y diagrama de componentes: En este apartado, el diagrama de componentes es dependiente del estado seleccionado dentro del tipo de sistema. El programa por defecto trabaja usando un diagrama de componentes con enfriamiento y esta muestra la temperatura de cada sensor en las diferentes ubicaciones del sistema. Al seleccionar el tipo de diagrama sin enfriamiento, el diagrama de componentes cambia automáticamente su configuración.
- Instrucciones de uso: El apartado abre una ventana adicional con información del programa. El contenido de la ventana está separado en tres secciones, información, instrucciones, observaciones y recomendaciones. Cada sección permite al usuario entender el funcionamiento del programa, ventajas, desventajas y el procedimiento para realizar el proceso de evaluación.
- Procesamiento de imágenes: Abre una ventana donde se visualizan los diferentes procesos que intervienen en el ciclo de refrigeración. Al estar relacionado cada proceso con los resultados obtenidos en tiempo real, este diagrama se actualiza automáticamente al cambio de cada propiedad.

Más a detalle de cada apartado con respecto a la interfaz gráfica, se encuentra en el ANEXO V del presente documento.

2.7. Diseño del equipo de medición

Para diseñar el equipo de medición, se toma en cuenta todos los componentes que lleva incluido el prototipo inicial de medición (Figura 2. 65).

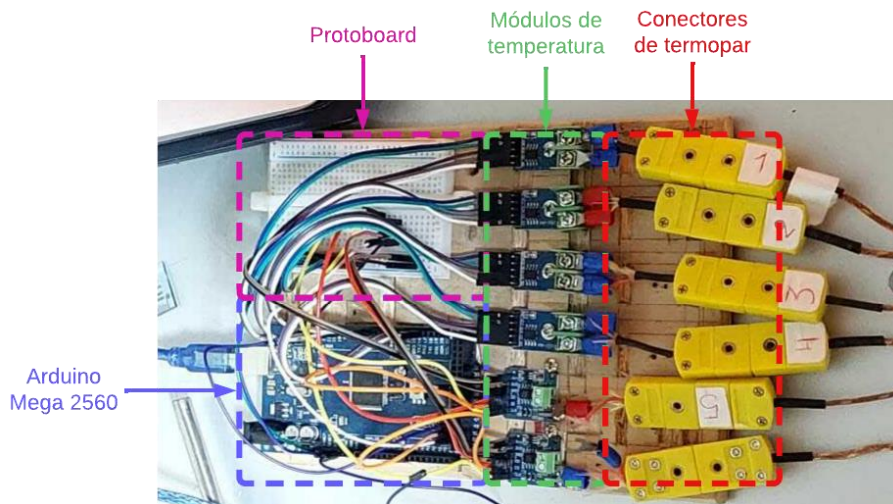


Figura 2. 65 Esquema del prototipo inicial

(Fuente: Propia)

Con el estado inicial del prototipo configurado y su correcto funcionamiento, se procede a realizar el diseño de la placa PCB (Placa de circuito impreso) con las pistas conductoras de cobre. Estas pistas simulan las conexiones de los cables mostrados en la Figura 2. 65. Para diseñar esta placa se utilizó el programa Proteus 8 y el esquema final de impresión se muestra en la Figura 2. 66.

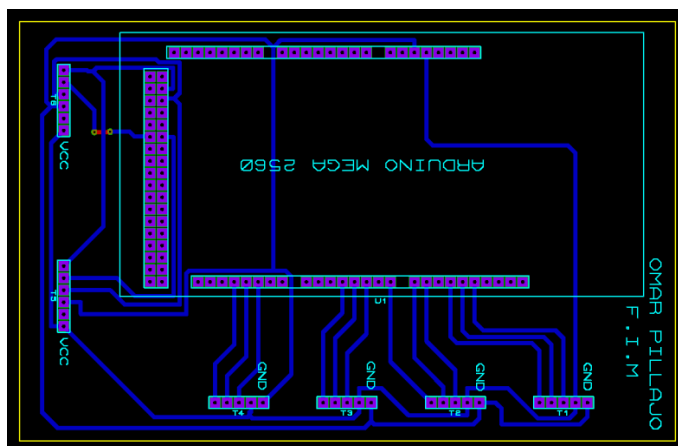


Figura 2. 66 Diseño de placa PCB en Proteus

(Fuente: Propia)

La identificación de cada módulo está asociado a un termopar y el estado (ejemplo: Sensor de temperatura estado 1 "T1"). El proceso de impresión y terminado de la placa PCB, es realizado en diferentes pasos, los cuales se detallan en el ANEXO VI. El prototipo electrónico final se muestra en la Figura 2. 67.

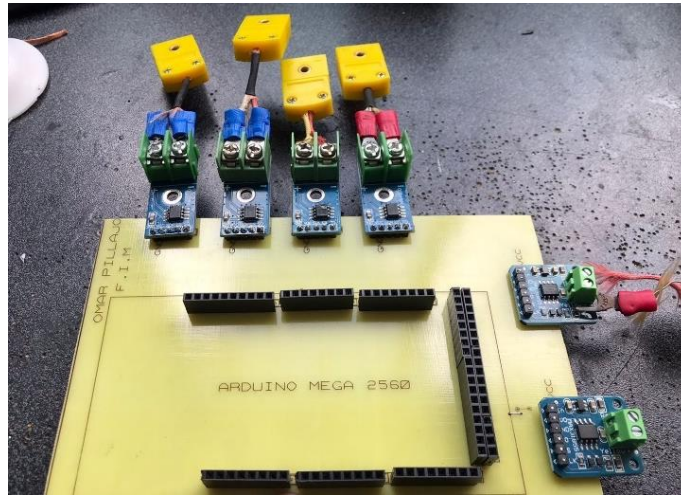


Figura 2. 67 Prototipo electrónico final
(Fuente: Propia)

Con la placa PCB construida, se procede a diseñar en 3D la geometría referencial de cada componente del prototipo final, entre ellos:

- Prototipo electrónico final

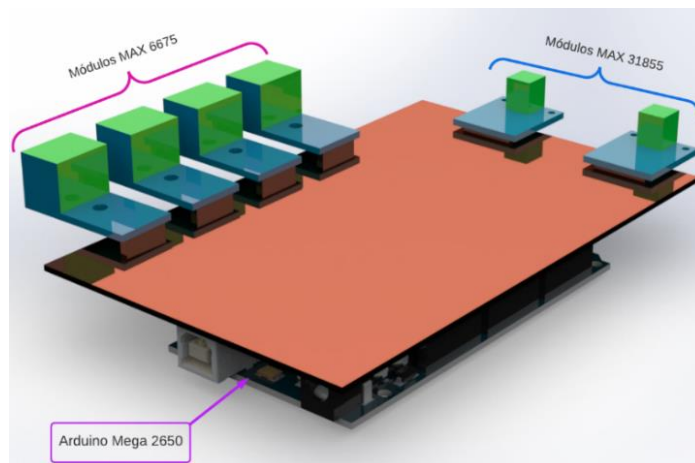


Figura 2. 68 Diseño del Prototipo electrónico en 3D
(Fuente: Propia)

- Conector termopar hembra

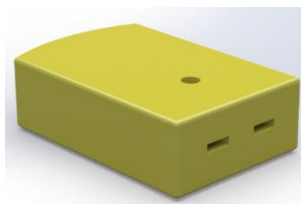


Figura 2. 69 Diseño del conector hembra para termopar en 3D
(Fuente: Propia)

Con las geometrías en 3D realizadas, se interactúa espacialmente la distribución de componentes, buscando la geometría óptima y compacta, para crear el estuche del equipo (Figura 2. 70).

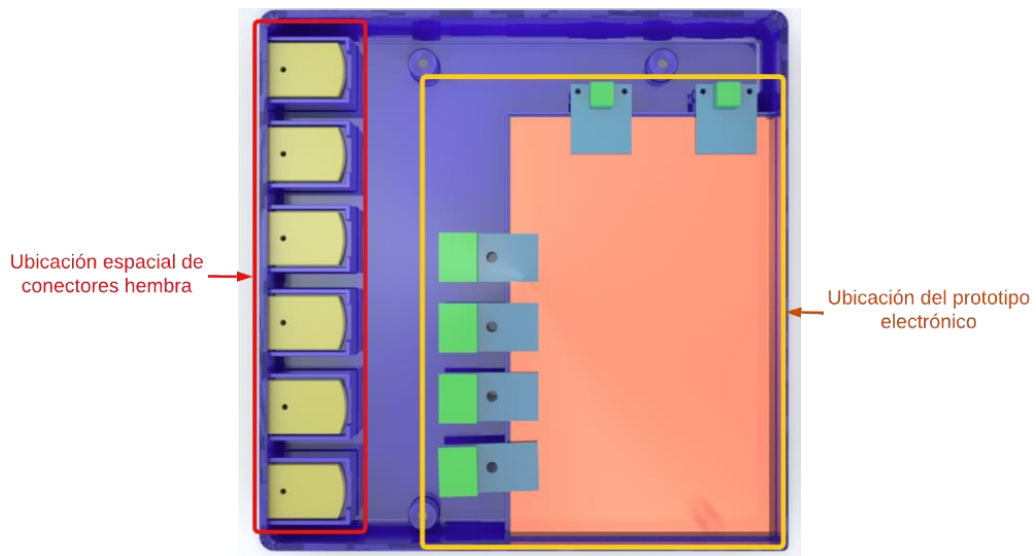


Figura 2. 70 Ubicación espacial de componentes en el estuche
(Fuente: Propia)

Con la geometría espacial de la Figura 2. 70, se crea la geometría espacial del estuche, el cual consta de una base donde se ajustan todos los componentes y una tapa que los recubre

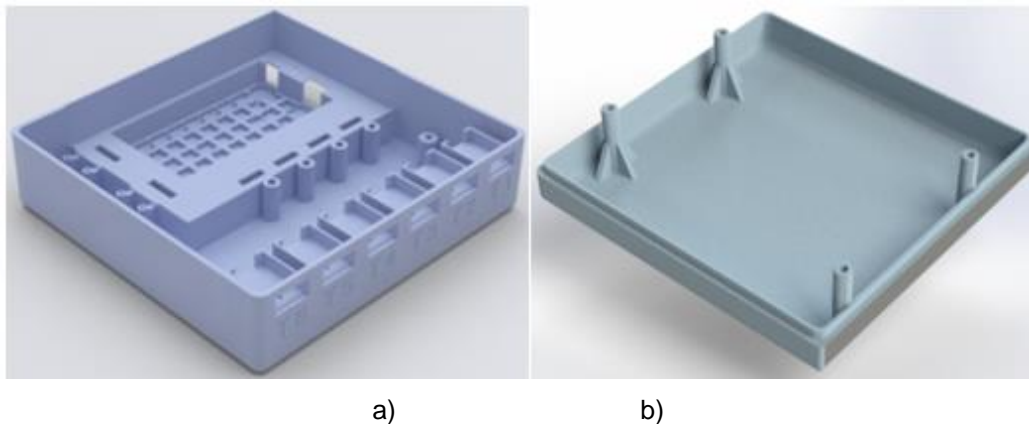


Figura 2. 71 a) Base del estuche; b) Tapa del estuche
(Fuente: Propia)

Todo el estuche del prototipo (Base y tapa) se realizará con ayuda de impresión 3D. El plano general de cada componente del estuche se encuentra en el ANEXO VII.

2.8. Construcción del equipo

En la siguiente sección se da a conocer el procedimiento realizado para la construcción del equipo final y los costos asociados. La metodología de todo el proceso de construcción se presenta en la Figura 2. 72.

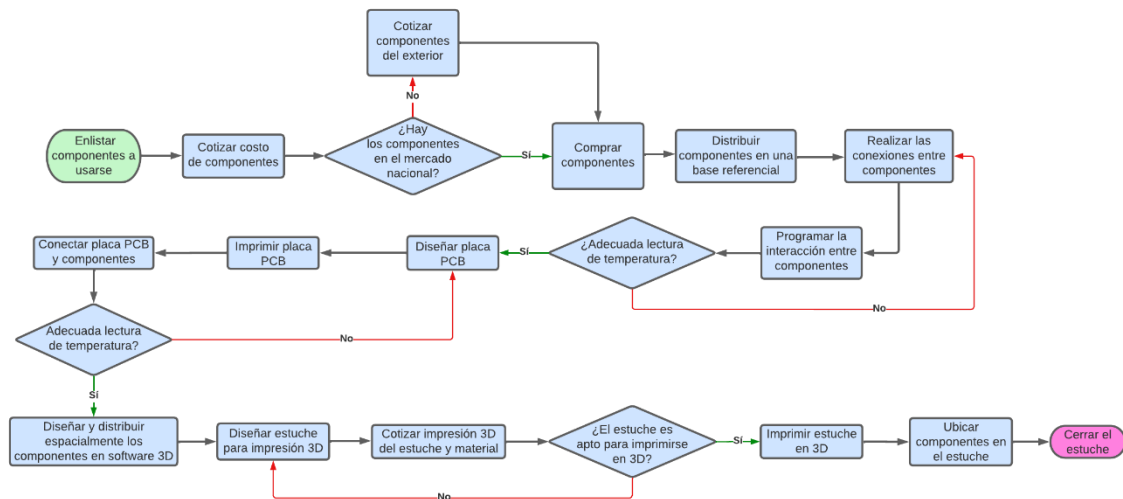


Figura 2. 72 Metodología para el construir el equipo final del proyecto
(Fuente: Propia)

Costos en compra de componentes.

A continuación, se enlista en la Tabla 2.21 los costos asociados de los componentes adquiridos para las pruebas con el prototipo inicial.

Tabla 2.21 Costos de los componentes del prototipo inicial

Ítem	Cant.	Descripción	Precio unitario [\$]	Precio total [\$]
1	1	Arduino Mega 2560 genérico	\$ 24,00	\$ 24,00
2	4	Módulo MAX 6675 para termopar tipo K	\$ 8,75	\$ 35,00
3	2	Módulo MAX 31855 para termopar tipo K	\$ 17,99	\$ 35,98
4	1	Protoboard pequeño 400 puntos	\$ 2,99	\$ 2,99
5	30	Cables jummpers L=10 cm macho-hembra	\$ 0,10	\$ 3,00
6	6	Conector Termopar Tipo K macho	\$ 6,00	\$ 36,00
7	6	Conector Termopar Tipo K hembra	\$ 6,00	\$ 36,00
8	1	Cinta termofundible 1 metro	\$ 1,00	\$ 1,00
9	1	Pasta térmica ANERA 15 g	\$ 4,70	\$ 4,70
10	20	Tornillos para madera D=3 mm	\$ 0,05	\$ 1,00
			Total	\$179,67

(Fuente: Propia)

La construcción del equipo inicial se mostró previamente en la Figura 2. 65 de la sección anterior.

Costo en elaboración de placa PCB

Posterior a realizar las pruebas con el equipo inicial, se avanzó con la elaboración de la placa PCB. Los costos asociados a la elaboración de este componente se muestran en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22 Costos para elaboración de prototipo electrónico

Ítem	Cant.	Descripción	Precio unitario [\$]	Precio total [\$]
1	2	Horas de tutoría y diseño en placas PCB	\$ 10,00	\$ 20,00
2	1	Impresión placa PCB dimensiones 90x140 mm	\$ 14,00	\$ 14,00
3	8	Espadines macho de 20 mm 6 pines	\$ 0,75	\$ 6,00
4	2	Espadines macho de 15 mm 8 pines	\$ 0,25	\$ 0,50
5	136	Puntos de soldadura	\$ 0,15	\$ 20,40
Total				\$ 60,90

(Fuente: Propia)

Impresión en 3D y costos asociados

En la elaboración del equipo, hay tres componentes que están realizados en impresión 3D:

- Base del estuche
- Tapa del estuche
- Pinzas para termopares

La base y la tapa del estuche están impresos con filamento PLA de color negro. Este filamento es el más usado en impresión 3D, debido a que es económico, tiene buena rigidez y no es tóxico e inflamable. El cobro de la impresión en 3D se lo realiza por hora de impresión o por gramo de material. Para este caso se realizó el cobro en hora de impresión mostrada en la Tabla 2.23.

Tabla 2.23 Costos de impresión en 3D del estuche

Ítem	Horas de impresión [h]	Descripción	Precio por hora [\$/h]	Precio total [\$]
1	8	Impresión de tapa	\$ 2,50	\$ 20,00
2	14	Impresión de base	\$ 2,50	\$ 35,00
Total				\$ 55,00

(Fuente: Propia)

Además, se incluye un costo adicional de ocho acoples hembra para tornillo M3, los cuales permiten fijar la base y la tapa del equipo.

Por otra parte, se ha diseñado una pinza para que el termopar se mantenga fijo y este sea adapte a la línea de tubería en cada punto de evaluación. La geometría de la pinza se muestra en la Figura 2. 73.

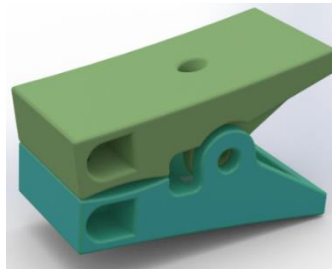


Figura 2. 73 Geometría de pinza para impresión 3D

(Fuente: Propia)

Al ser un componente que va a manipularse con diferentes esfuerzos, se decidió usar impresión con resina tough 1500. Esta resina hace que el cuerpo se haga macizo debido a que posterior a la impresión se lo realiza un proceso de curado, el cual permite entrelazar el material y unificarlo en una sola estructura. El costo de este componente se muestra en

Tabla 2.24 Costo de impresión 3D de las pinzas

Ítem	Horas de impresión [h]	Descripción	Precio por hora [\$ /h]	Precio total [\$]
1	5,5	Impresión de pinza en resina tough 1500	\$ 12,00	\$ 66,00
			Total	\$ 66,00

(Fuente: Propia)

La Figura 2. 74 muestra el equipo final del proyecto.

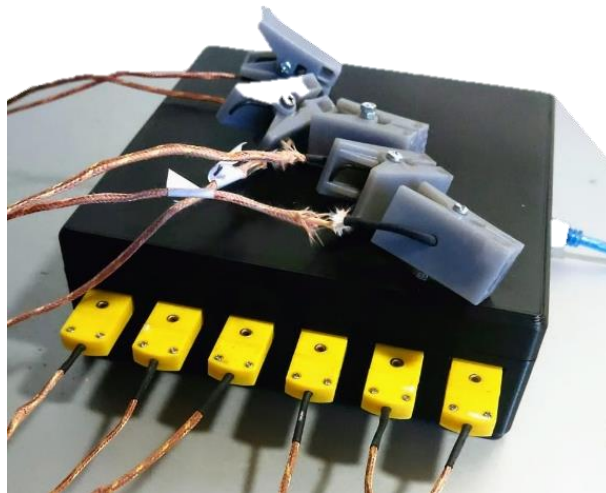


Figura 2. 74 Prototipo final del proyecto

(Fuente: Propia)

En el ANEXO VIII se agrupa el total de la inversión para el proyecto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cumpliendo los objetivos del proyecto, para verificar la validación del trabajo se realiza pruebas en equipos de refrigeración. Dentro de estos equipos se encuentran proyectos de titulación en los laboratorios de la EPN. Los equipos presentados a continuación, son confiables puesto que la instrumentación está acoplada a la tubería del sistema y con esta configuración se obtiene información acertada de presión y temperatura del refrigerante en diferentes lugares. Dentro de cálculos realizados se analiza el porcentaje de error entre los datos para diferentes casos y como este puede corregirse en el trabajo. El desarrollo completo de las pruebas puede ser revisado en los anexos especificados para cada prueba. Además, en el ANEXO IV referido al código de programación en Arduino, en la sección del “void loop”, se muestran las ecuaciones resultantes de las curvas de ajuste obtenidas mediante calibración manual. Esto se realizó teniendo como referencia para el extremo superior la temperatura del agua en ebullición a 91°C (a la altitud de Quito) y la temperatura inferior de 0°C con respecto al punto de congelamiento del agua.

3.1. Resultados

3.1.1. Pruebas preliminares en el equipo Chiller de la ESFOT

El Equipo Chiller de la ESFOT, es un equipo de refrigeración enfriado por aire que cuenta con los siguientes componentes principales:

- Compresor
- Chiller
- Ventilador
- Filtro deshidratador
- Válvula de expansión
- Evaporador

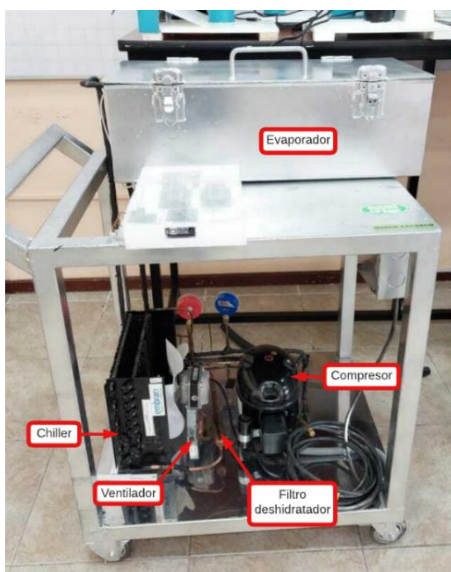


Figura 3. 1 Equipo de refrigeración Chiller
(Fuente: Propia)

El equipo consta de la siguiente instrumentación:

- Manómetros de alta y baja presión, a los cuales se suma la presión barométrica para analizar los resultados.
- Termopares con módulos MAX 6675 ubicados en puntos estratégicos del equipo
- Sistema de monitoreo de temperaturas superficiales y temperatura del fluido.

Las pruebas se realizaron para tres casos considerando la influencia de la temperatura ambiente:

- Caso 1: Termopares sin aislamiento
- Caso 2: Termopares con pasta térmica
- Caso 3: Termopares con pasta térmica y aislamiento

Para cada caso se han considerado las siguientes condiciones:

- Temperatura ambiente: 19 °C
- Tiempo de estabilización de la temperatura: 15 minutos
- Temperatura en la cabina del evaporador: 11 °C aprox.
- Carga interna en el evaporador: 6 litros de agua.
- Tiempo de lectura de datos: 5 minutos
- Tipo de refrigerante: R134a

Las temperaturas registradas se tabulan cada 30 segundos y estas al final se promedian. La temperatura promedio se utiliza para comparar con los datos obtenidos del sistema de control de temperatura del propio equipo. La ubicación de los termopares según la Figura 3. 2 es preliminar de acuerdo a las ubicaciones experimentales sugeridas en el trabajo. Más a detalle de la prueba realizada, se puede encontrar en el ANEXO IX.

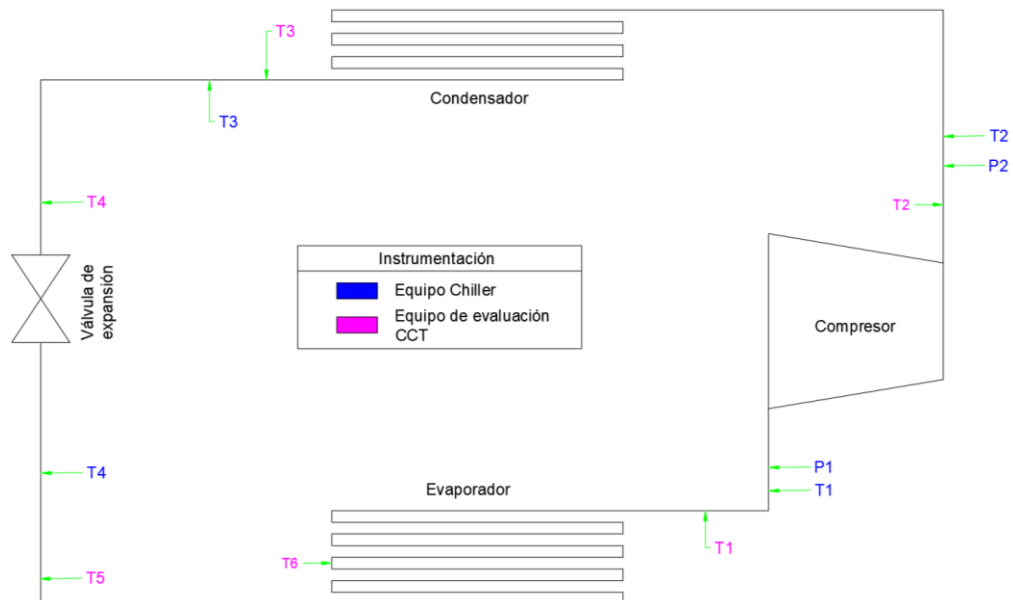


Figura 3. 2 Diagrama de instrumentación en el equipo Chiller

(Fuente: Propia)

Caso 1: Termopares sin aislamiento

Tabla 3. 1 Temperaturas registradas en los termopares sin aislamiento

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	292,73	308,10	292,26	291,33	261,75	267,75
60	292,73	308,10	292,01	291,33	261,50	267,75
90	292,23	308,10	292,01	291,08	261,75	267,75
120	292,48	308,10	291,76	291,33	261,75	267,75
150	293,33	307,85	292,26	291,08	261,75	267,75
180	292,98	308,10	292,01	291,33	261,75	267,75
210	293,23	307,85	292,51	291,58	261,50	267,75
240	293,23	307,85	292,51	291,33	261,50	267,75
270	292,23	308,10	291,76	291,33	261,75	267,75
300	293,23	307,60	292,01	291,08	261,75	267,75
Promedio	292,84	307,98	292,11	291,28	261,68	267,75

(Fuente: Propia)

Caso 2: Termopares con pasta térmica

Tabla 3. 2 Temperaturas registradas en los termopares con uso de pasta térmica

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	291,73	311,85	293,76	292,83	259,25	262,50
60	291,98	311,60	293,76	292,58	259,25	262,25
90	291,23	311,10	293,26	292,58	259,25	262,50
120	291,48	311,85	293,76	292,33	259,25	262,25
150	291,48	311,60	293,01	292,08	259,50	262,75
180	291,48	312,10	293,51	292,33	259,50	262,75
210	291,48	311,35	293,76	292,58	259,50	262,75
240	291,23	312,10	293,26	292,83	259,50	263,00
270	291,73	311,85	293,51	292,33	259,50	262,75
300	291,48	311,85	293,26	292,83	259,50	262,50
Promedio	291,53	311,73	293,49	292,53	259,40	262,60

(Fuente: Propia)

Caso 3: Termopares con pasta térmica y aislamiento.

Tabla 3. 3 Temperaturas registradas en termopares con uso de pasta térmica y aislamiento.

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	291,23	311,85	293,76	292,83	259,50	262,25
60	291,23	311,85	294,01	292,58	259,25	262,25
90	290,73	311,10	293,76	292,83	259,25	262,50
120	290,98	311,85	294,26	292,58	259,25	262,25
150	290,73	311,85	294,01	292,58	259,50	262,75
180	290,98	312,10	293,51	292,83	259,50	262,75
210	290,98	311,35	294,26	292,83	259,50	262,75
240	290,73	312,10	293,76	293,08	259,50	263,00
270	291,23	311,85	294,01	293,08	259,50	262,75
300	290,98	311,60	293,76	292,83	259,50	262,75
Promedio	290,98	311,75	293,91	292,81	259,43	262,60

(Fuente: Propia)

Temperaturas registradas con el sistema de control del Chiller

Tabla 3. 4 Temperaturas registradas en termopares del equipo Chiller.

Tiempo [s]	Temperatura [K]		
	T1	T2	T3
30	286,15	318,90	293,90
60	285,40	318,90	293,65
90	285,90	318,90	293,40
120	285,65	319,15	294,15
150	285,65	319,40	294,15
180	285,40	319,40	294,15
210	286,15	319,15	294,15
240	285,40	319,15	294,15
270	285,65	318,90	294,40
300	285,40	319,40	294,15
Promedio	285,68	319,13	294,03

(Fuente: Propia)

Comparativa de resultados de temperatura

Para la comparativa de resultados, se calcula el error porcentual para todos los casos de las temperaturas registradas en los diferentes estados teniendo como referencia los valores de temperatura registrados en la instrumentación del propio equipo.

$$\%error: \frac{T_{n\ caso} - T_{instr.}}{T_{instr.}} * 100 \quad (11)$$

Donde:

$T_{n\ caso}$: Temperatura obtenida con CCT para el caso de estudio [K]

n : Estado con respecto a los puntos de medición

$T_{instr.}$: Temperatura obtenida en la instrumentación del equipo [K]

Con la ecuación (11) se procede a calcular el error porcentual para los casos planteados en cuanto a la medición de temperatura.

Tabla 3. 5 Error porcentual entre los termopares para cada caso

	Temperatura [K]		
	T1	T2	T3
Referencial: Instrumentación del equipo	285,68	319,13	294,03
Caso 1: Sin aislamiento	292,84	307,98	292,11
Caso 2: Pasta térmica	291,53	312,98	293,49
Caso 3: Pasta térmica y aislamiento	290,98	313,25	293,91
% error			
Caso 1: Sin aislamiento	2,51	3,49	0,65
Caso 2: Pasta térmica	2,05	1,93	0,18
Caso 3: Pasta térmica y aislamiento	1,86	1,84	0,04

(Fuente: Propia)

El caso referencial corresponde a la temperatura registrada por el sistema de control de temperaturas del equipo Chiller. Son confiables estas temperaturas, puesto que se calibran periódicamente en los laboratorios.

Caída de temperatura en la tubería posterior al filtro deshidratador

Se analiza la caída de temperatura considerando que la tubería hasta la válvula de expansión es de 1.6 m y gran parte de longitud está expuesta a la temperatura ambiente.

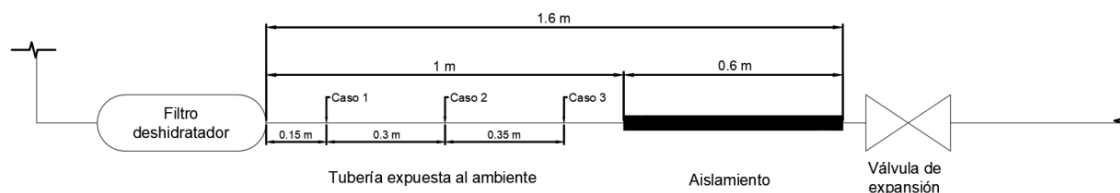


Figura 3. 3 Diagrama de conexión entre filtro deshidratador y válvula de expansión

(Fuente: Propia)

Las temperaturas para cada caso se tabulan en la Tabla 3. 6.

Tabla 3. 6 Caída de temperatura en la tubería de conexión entre el filtro deshidratador y válvula de expansión

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Temperatura [K]	292,2	291,5	292,7

(Fuente: Propia)

La caída de temperatura posterior a la salida del condensador es de 3 °C, la cual se considera como temperatura de subenfriamiento en la evaluación final del sistema.

Caso 1: Evaluación de equipo Chiller con propia instrumentación

Para evaluar el sistema de refrigeración, se calculan las propiedades del ciclo de refrigeración, en primera instancia se calcula la presión de alta (condensador) y baja (evaporador) del sistema.

$$P_{baja} = (15 + 10.44)psi = 25.44 psi \cong 175.40 kPa$$

$$P_{alta} = (75 + 10.44)psi = 85.44 psi \cong 589.088 kPa$$

Al calcular las presiones del sistema, estas se tabulan y se calculan las demás propiedades del refrigerante con base en las temperaturas y presiones registradas del equipo. El equipo consta de cinco estados determinados con la propia instrumentación.

Tabla 3. 7 Propiedades del refrigerante según instrumentación del equipo Chiller

Propiedad	Estado				
	1	2	3	4	5
Temperatura [K]	285,68	319,13	294,03	259,80	259,80
Presión [Pa]	175402,69	589088,29	589088,29	175402,69	175402,69
Entalpía [J/kg]	412436,95	434726,64	228706,80	228706,80	390634,35
Entropía [J/kg.K]	1815,80	1797,54	1100,41	1112,53	1735,81
Calidad			0,00		1,00

(Fuente: Propia)

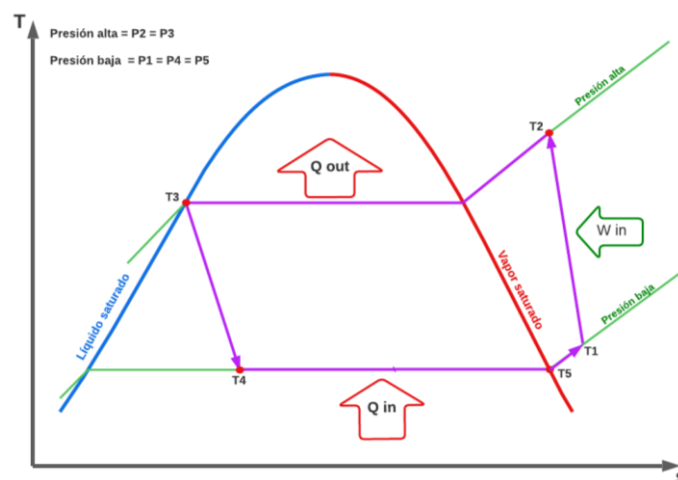


Figura 3. 4 Ubicación de estados en el equipo Chiller
(Fuente: Propia)

Con las propiedades determinadas de todos los estados, se procede a calcular el calor de entrada y salida, el trabajo del compresor y el COP.

Tabla 3. 8 Resultados del sistema según la instrumentación del equipo

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	161927,55	J/kg
Calor de salida	206019,84	J/kg
Trabajo	24407,9	J/kg
COP	6,63	

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Caso 2: Evaluación de equipo Chiller con CCT sin ajuste

Con el equipo Cooling Cycle Tester (CCT), se registran las propiedades del refrigerante en un instante determinado y se registran en una hoja de cálculo de Excel.

Tabla 3. 9 Propiedades del refrigerante calculados con Cooling Cycle Tester

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	290,8	313,0	294,3	291,4	259,4	262,6
Presión [Pa]	196284,4	591581,8	591581,8	591581,8	196284,4	196284,4
Entalpía [J/kg]	416402,3	428726,7	229031,0	225031,1	181817,9	392332,9
Entropía [J/kg.K]	1820,8	1778,2	1101,5	1087,8	932,0	1733,7
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Con las propiedades registradas, se procede a calcular calores de entrada y salida, trabajo del compresor y COP. Estas se tabulan en una hoja de cálculo de Excel

Tabla 3. 10 Calculo de resultados del proceso sin ajuste

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	167301,72	J/kg
Calor de salida	203695,54	J/kg
Trabajo	16800,1	J/kg
COP	9,96	

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Caso 3: Evaluación de equipo Chiller con CCT con ajuste

El ajuste de temperatura se lo realiza con respecto a la presión alcanzada en el evaporador. Para ello, se calcula la temperatura correspondiente a la presión en el evaporador y el refrigerante como gas saturado (Calidad = 1). El cálculo se lo realiza con la librería Coolprop de Excel.

Tabla 3. 11 Temperatura alcanzada en el evaporador según la presión de baja

	Propiedad		
	Presión [kPa]	Calidad (x)	T. evaporador [K]
Valor	161,61	1	257,80

(Fuente: Propia)

Al calcular la temperatura en el evaporador, para que la temperatura del evaporador llegue a tener esta temperatura, se ajusta la temperatura de recalentamiento, hasta que la temperatura en el estado 5 que baja isoentálpicamente (T5h), sea similar a la temperatura asociada a la presión alcanzada por el manómetro mostrado en la Tabla 3. 11.

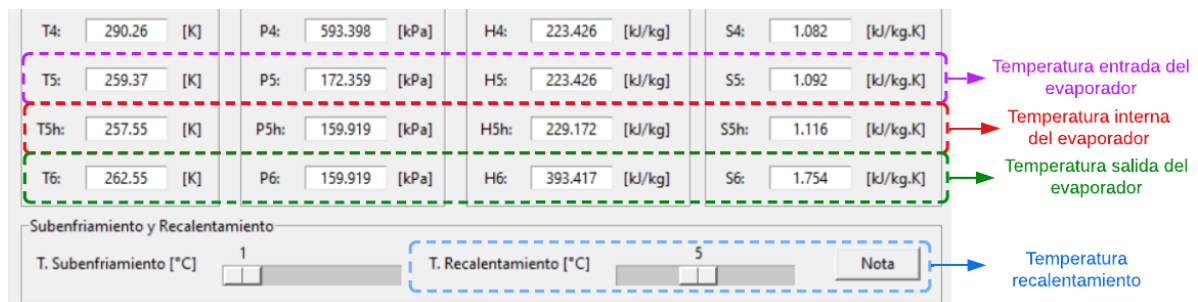


Figura 3. 5 Ajuste con temperatura de recalentamiento en CCT

(Fuente: Propia)

Al ajustar la temperatura, se procede a calcular las propiedades del refrigerante en los diferentes estados del sistema.

Tabla 3. 12 Propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	290,8	313,0	294,3	291,4	259,5	262,5
Presión [Pa]	159256,6	591581,8	591581,8	591581,8	159256,6	159256,6
Entalpía [J/kg]	417167,0	428726,7	229031,0	225031,1	390920,7	389199,8
Entropía [J/kg.K]	1839,8	1778,2	1101,5	1087,8	1744,3	1737,7
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Con las propiedades determinadas, se procede a calcular el calor de entrada y salida, el trabajo del compresor y el COP del equipo Chiller.

Tabla 3. 13 Resultados calculados para los procesos del sistema

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	164168,71	J/kg
Calor de salida	203695,54	J/kg
Trabajo	17728,4	J/kg
COP	9,26	

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Error porcentual para todos los casos de evaluación

El error porcentual se determina, considerando que el equipo Cooling Cycle Tester utiliza solo temperaturas superficiales, y estas pueden verse afectadas al ser influenciadas por corrientes de aire como el ventilador del Chiller. Por esta razón, se realizaron diferentes evaluaciones para compararse con respecto a los resultados obtenidos con la propia instrumentación del equipo. Para determinar el error porcentual, los valores medidos son para los resultados obtenidos con el CCT y como referencia se utiliza los resultados obtenidos por la propia instrumentación del equipo.

$$\%error: \frac{R_{CCT} - R_{instr.}}{R_{instr.}} * 100 \quad (12)$$

Donde:

R_{CCT} : Resultado obtenido con Cooling Cycle Tester (CCT) [u]

$R_{instr.}$: Resultado obtenido con la instrumentación del equipo [u]

Tabla 3. 14 Error porcentual para cada caso de evaluación

Resultados	Calor de entrada [J/kg]	Calor de salida [J/kg]	Trabajo [J/kg]	COP
Equipo Instrumentado	161927,5	206019,8	24407,9	6,63
Cooling Cycle Tester sin ajuste	167301,7	203695,5	16800,1	9,96
Cooling Cycle Tester con ajuste	164168,7	203695,5	17728,4	9,26
% Error				
Cooling Cycle Tester sin ajuste	3,32	1,13	31,17	50,11
Cooling Cycle Tester con ajuste	1,38	1,13	27,37	39,58

(Fuente: Propia)

Diagrama T-s comparativo para los casos de evaluación

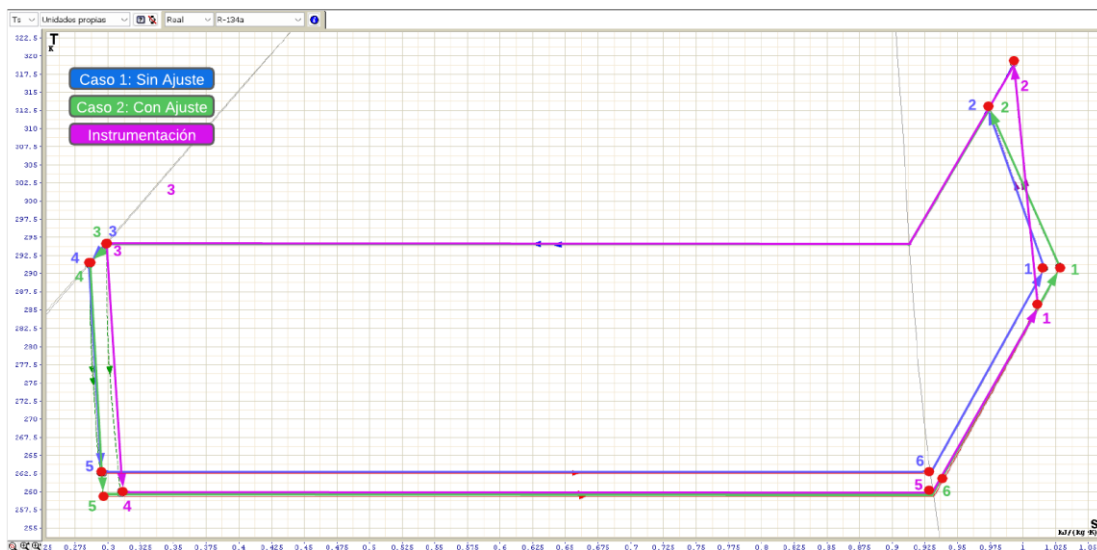


Figura 3. 6 Diagrama T-s para los diferentes casos de evaluación analizados
(Fuente: Propia)

3.1.2. Pruebas preliminares en el equipo de refrigeración del laboratorio de termodinámica

El equipo de laboratorio de termodinámica cuenta con un sistema complejo en comparación a los equipos de refrigeración convencionales.



Figura 3. 7 Equipo de refrigeración del laboratorio de termodinámica FIM
(Fuente: Propia)

A diferencia de los equipos convencionales, este equipo cuenta con una unidad condensadora donde se encuentra gran parte de los componentes principales del sistema.

Otra característica del equipo es que cuenta con cuatro tipos de evaporadores, los cuales son:

- Banco de hielo
- Aire acondicionado
- Cámara frigorífica
- Banco de resistencias

Para el desarrollo de las pruebas, primero se identifica los componentes principales del equipo (compresor, condensador, dispositivo de expansión y evaporador). Posteriormente, se identifica la instrumentación que posee el equipo propiamente. En este caso el equipo cuenta con:

- Manómetros de presión y manómetro de señal digital
- Sensores de temperatura y sensores digitales de temperatura.

Los sensores de temperatura están totalmente aislados de la temperatura ambiente. La Figura 3. 8 muestra un esquema del posicionamiento de la instrumentación del equipo propiamente. Además, al esquema se añade la ubicación de los termopares para realizar la evaluación del sistema con el Cooling Cycle Tester (CCT).

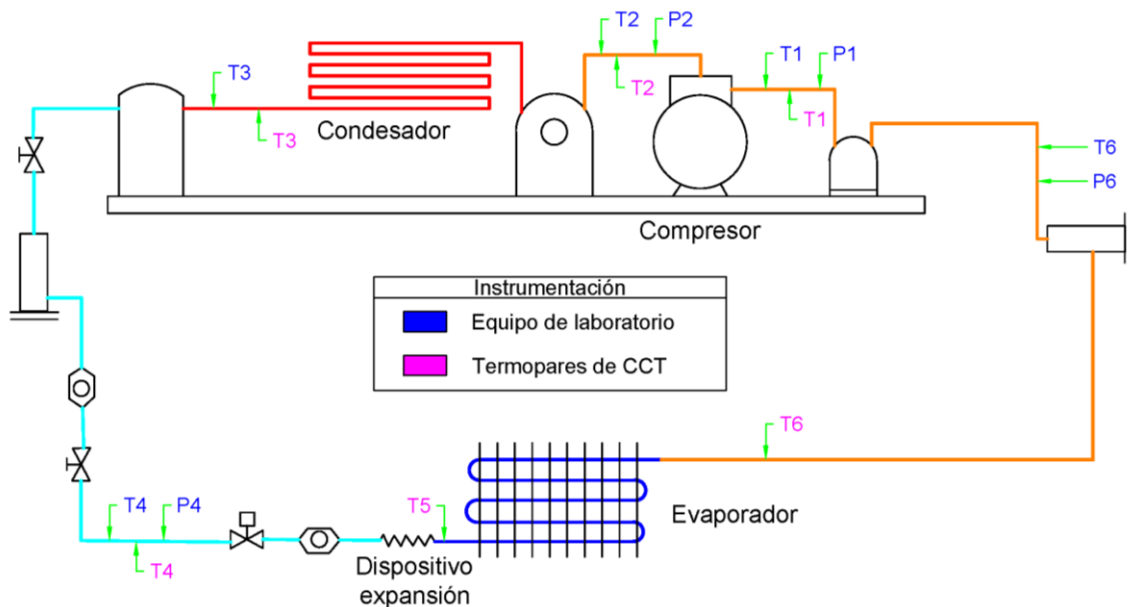


Figura 3. 8 Diagrama de instrumentación del equipo de laboratorio y ubicación de termopares para evaluar con CCT

(Fuente: Propia)

Las pruebas son desarrolladas para dos casos. El primer caso es la evaluación del sistema sin realizar ningún ajuste en la interfaz gráfica, y el segundo caso es ajustando bajo supuestos la temperatura de subenfriamiento y la de recalentamiento. Para el desarrollo de las pruebas se consideraron las siguientes condiciones:

- Temperatura ambiente: 22 °C
- Tiempo en operación del equipo: 15 minutos
- Tiempo de evaluación del sistema con CCT: 5 minutos

- Evaporador: Banco de hielo

Más a detalle del desarrollo de esta prueba se encuentra en el ANEXO X.

Caso 1: Evaluación del equipo de refrigeración sin ajustes en CCT

Para evaluar el sistema, se registra las temperaturas durante cinco minutos y se promedia la temperatura para usar un solo valor como referencia.

Tabla 3. 15 Registro de temperaturas usando Cooling Cycle Tester

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	282,57	307,45	305,69	302,69	275,94	278,64
60	282,32	306,95	305,69	302,69	275,94	278,64
90	282,57	307,45	305,44	302,44	275,94	278,64
120	282,32	307,45	305,44	302,44	275,94	278,89
150	282,32	307,45	305,44	302,44	275,94	278,64
180	282,32	306,95	305,44	302,44	275,94	278,89
210	282,07	307,45	304,44	301,44	275,94	278,64
240	282,32	307,20	304,94	301,94	276,44	278,64
270	282,07	306,95	304,94	301,94	276,44	278,64
300	282,57	306,70	304,94	301,94	275,94	278,64
Promedio	282,35	307,20	305,24	302,24	276,04	278,69

(Fuente: Propia)

Usando las temperaturas promedio de la Tabla 3. 15, se determina las propiedades del refrigerante en cada estado mediante uso de Coolprop en Excel.

Tabla 3. 16 Propiedades del sistema para diferentes estados de temperatura

Propiedad	Estados					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	282,3	307,2	305,2	302,2	276,0	278,7
Presión [Pa]	356270,6	817507,8	817507,8	817507,8	356270,6	356270,6
Entalpía [J/kg]	405160,8	417930,1	244753,5	240407,2	240407,2	401800,6
Entropía [J/kg.K]	1736,2	1720,7	1153,3	1139,0	1145,1	1724,2
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Con los estados completamente definidos, se determina los procesos principales como calor de entrada y salida, trabajo del compresor y COP del ciclo.

Tabla 3. 17 Resultados del ciclo evaluado con CCT sin ajustes en el sistema

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	161393,4	J/kg
Calor de salida	177522,9	J/kg
Trabajo	15157,6	J/kg
COP	10,65	--

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado como calor de entrada en el evaporador.

Caso 2: Evaluación del equipo de refrigeración con ajustes en CCT

El equipo, al ser más complejo y con mayor cantidad de accesorios, genera mayor rechazo de calor hacia el ambiente. Considerando esto se decidió que la temperatura del estado 4 (T4) se aproxime hasta la temperatura ambiente. Esto se logra configurando la temperatura de subenfriamiento. Por otro lado, la temperatura en el evaporador es medida con recalentamiento y para acercarse a la temperatura en el evaporador se configuró la temperatura de recalentamiento (Figura 3. 9). Con el ajuste en la ventana del Cooling Cycle Tester, se realiza la evaluación del sistema registrando las temperaturas cada 30 segundos durante 5 minutos.

Tabla 3. 18 Registro de temperaturas usando Cooling Cycle Tester

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	280,72	306,59	304,34	294,34	275,59	276,54
60	280,47	307,59	304,34	294,34	275,59	276,54
90	279,97	307,59	304,34	294,34	275,34	276,54
120	279,97	307,59	304,84	294,84	275,34	276,79
150	279,47	306,59	304,34	294,34	275,34	276,79
180	279,97	307,59	304,09	294,09	275,34	276,79
210	279,97	307,59	304,09	294,09	275,59	276,54
240	279,97	307,59	304,34	294,34	275,34	276,79
270	279,97	307,59	304,09	294,09	275,34	276,79
300	279,47	306,59	304,34	294,84	275,59	276,54
Promedio	280,00	307,29	304,32	294,37	275,44	276,67

(Fuente: Propia)



Figura 3. 9 Configuración de subenfriamiento y recalentamiento para evaluar el sistema con CCT.
(Fuente: Propia)

Con las temperaturas promedio, se determinan las propiedades del refrigerante en los diferentes estados del sistema.

Tabla 3. 19 Propiedades del refrigerante en diferentes estados del ciclo

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	280,0	307,3	304,3	294,4	275,4	276,7
Presión [Pa]	331959,7	796306,6	796306,6	796306,6	331959,7	331959,7
Entalpía [J/kg]	403671,7	418550,5	243409,6	229193,6	229193,6	400640,5
Entropía [J/kg.K]	1736,1	1724,5	1149,0	1101,5	1105,5	1725,2
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Con los estados completamente definidos, se calcula el calor de entrada y salida, el trabajo del compresor y el COP.

Tabla 3. 20 Resultados del ciclo evaluado con ajustes en CCT

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	171446,9	J/kg
Calor de salida	189356,8	J/kg
Trabajo	16659,3	J/kg
COP	10,29	--

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado como calor de entrada en el evaporador.

Evaluación del sistema según la propia instrumentación del equipo

Al registrar las temperaturas del con los sensores del equipo, estas no variaban notablemente en un periodo largo de tiempo, por ende, se decidió seleccionar temperaturas puntuales a corto tiempo.

Tabla 3. 21 Registro de temperaturas según la instrumentación del equipo

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	282,75	316,15	310,25	310,25	272,40	279,65
60	282,75	316,15	310,25	310,25	272,40	279,65
Promedio	282,75	316,15	310,25	310,25	272,40	279,65

(Fuente: Propia)

Con el registro de temperaturas y la presión registrada en los manómetros, se calcula las propiedades del refrigerante para todos los estados.

Tabla 3. 22 Propiedades para los diferentes estados del sistema

Propiedad	Estados					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	282,8	316,2	310,3	310,3	272,4	279,7
Presión [Pa]	210000,0	1010000,0	1010000,0	1010000,0	210000,0	210000,0
Entalpía [J/kg]	409151,1	422985,5	252091,0	252091,0	252091,0	406492,0
Entropía [J/kg.K]	1790,3	1722,8	1176,6	1176,6	1198,0	1780,8

(Fuente: Propia)

Definidos todos los estados, se procede a determinar el calor de entrada y salida, trabajo del compresor, y COP del sistema.

Tabla 3. 23 Resultados del ciclo evaluado según la instrumentación del equipo

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	154417,4	J/kg
Calor de salida	170953,7	J/kg
Trabajo	24303,8	J/kg
COP	6,35	--

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado como calor de entrada en el evaporador.

Error porcentual en el registro de temperatura para los diferentes casos

El error porcentual permite tener una confiabilidad de los resultados obtenidos y las suposiciones realizadas. Como caso referencial de comparación se utiliza los datos obtenidos con la instrumentación del propio equipo y se aplica la ecuación (12) .

Tabla 3. 24 Error porcentual en las temperaturas registradas para los diferentes casos de evaluación

Denominación	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Referencial	282,69	316,15	310,22	310,21	272,25	279,60
Caso 1: Sin ajuste	282,35	307,20	305,24	302,24	276,04	278,69
Caso 2: Con ajuste	280,00	307,29	304,32	294,37	275,44	276,67
% Error						
Caso 1: Sin ajuste	0,12	2,83	1,61	2,57	1,39	0,33
Caso 2: Con ajuste	0,95	2,80	1,90	5,11	1,17	1,05

(Fuente: Propia)

Error porcentual de los procesos para cada caso de evaluación

Tabla 3. 25 Error porcentual para cada caso de evaluación

Caso	Calor de entrada [J/kg]	Calor de salida [J/kg]	Trabajo [J/kg]	COP
Equipo Instrumentado	154417,4	170953,7	24303,8	6,4
Cooling Cycle Tester sin ajuste	161393,4	177522,9	15157,6	10,6
Cooling Cycle Tester con ajuste	171446,9	189356,8	16659,3	10,3
% Error				
Cooling Cycle Tester sin ajuste	4,5	3,8	37,6	67,6
Cooling Cycle Tester con ajuste	11,0	10,8	31,5	62,0

(Fuente: Propia)

Diagrama T-s para los diferentes casos de evaluación

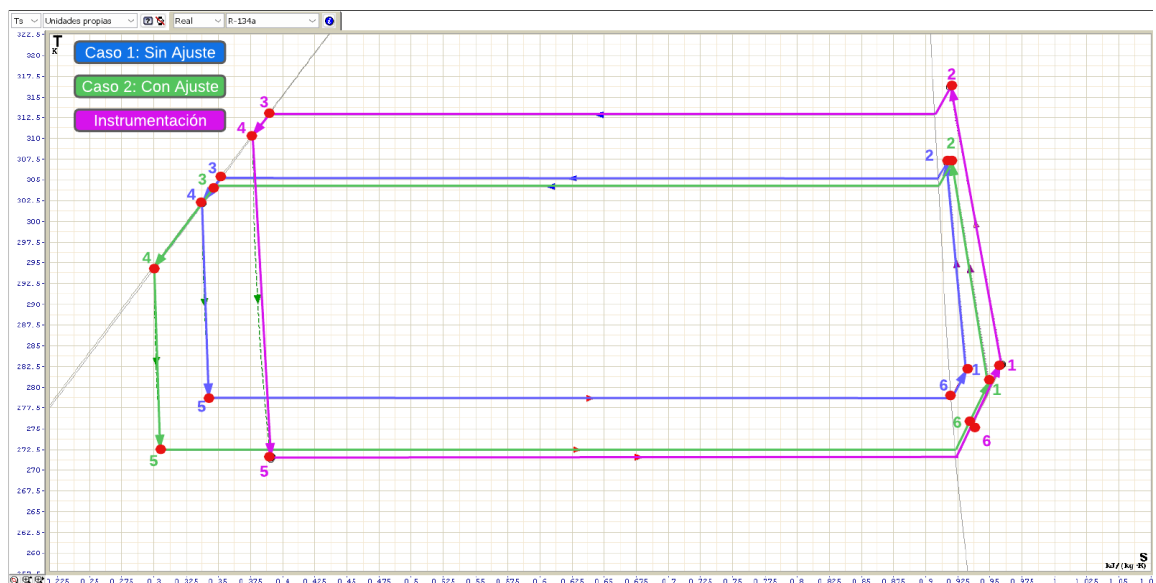


Figura 3. 10 Diagrama T-s para los casos de evaluación analizados

(Fuente: Propia)

3.1.3. Pruebas preliminares en el equipo Split del laboratorio de termodinámica

El sistema Split es un nuevo equipo implementado por la ESFOT. Como es un equipo de refrigeración cuenta con los 4 componentes principales:

- Compresor
- Condensador
- Dispositivo de expansión
- Evaporador

Con relación a instrumentación, el equipo cuenta con:

- 2 manómetros y 2 sensores digitales de presión
- 1 sensor digital de temperatura
- 1 sistema de control de temperatura superficial

La mayor parte de las tuberías están recubiertas con coquillas de polietileno, las cuales aíslan la temperatura superficial de las tuberías de la temperatura ambiente. El equipo se muestra en la Figura 3. 11.

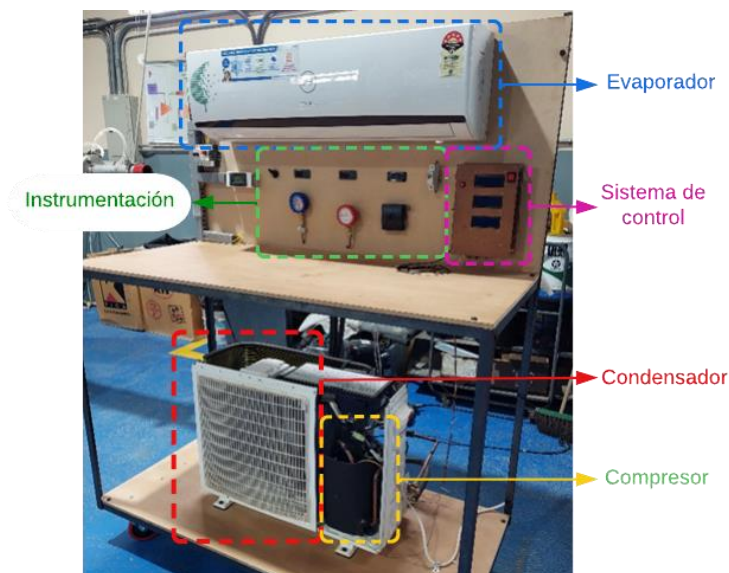


Figura 3. 11 Equipo Split

(Fuente: Propia)

Al identificar los componentes del sistema, se procede a ubicar los termopares en las respectivas ubicaciones del sistema. En la Figura 3. 12 se muestra el esquema de ubicación de la instrumentación para el Equipo Split y los termopares del Cooling Cycle Tester (CCT).

Bajo el mismo procedimiento realizado para los equipos previamente evaluados, en el primer caso, se realiza la evaluación del sistema sin ningún ajuste en el equipo. Posteriormente, en el segundo caso, se ajusta según se requiera la temperatura de subenfriamiento o recalentamiento del sistema.

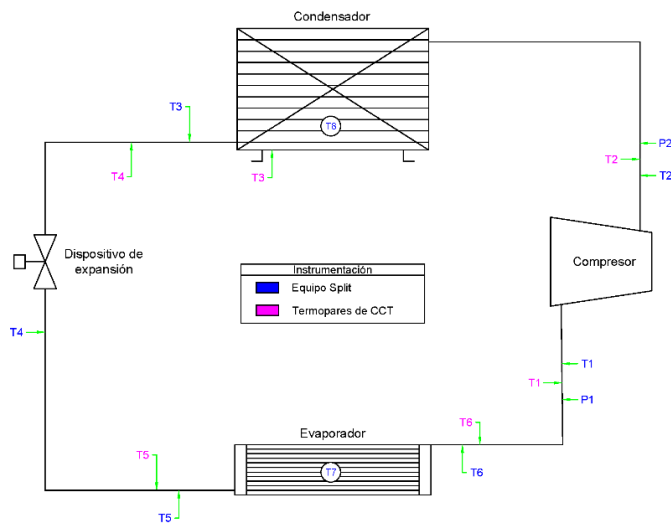


Figura 3. 12 Esquema de instrumentación del equipo Split
(Fuente: Propia)

Las condiciones para evaluar el sistema son las siguientes:

- Temperatura ambiente: 17 °C
- Tiempo de estabilización de temperaturas: 15 minutos
- Tiempo de evaluación del sistema: 5 minutos
- Temperatura en el aire acondicionado: 16 °C
- Tipo de refrigerante: R290

Más a detalle del proceso de evaluación para el Equipo Split se detalla en el ANEXO XI.

Evaluación del equipo sin ajustes de temperatura en CCT

Los datos de temperatura son registrados cada 30 segundos en un periodo de cinco minutos. Las temperaturas obtenidas se tabulan en la Tabla 3. 26.

Tabla 3. 26 Registro de temperaturas mediante uso de Cooling Cycle Tester

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	287,00	316,75	309,50	306,62	283,34	280,55
60	287,00	316,75	309,50	306,37	283,34	280,55
90	287,25	316,75	309,75	306,62	283,09	280,55
120	287,00	316,75	309,50	306,37	283,09	280,55
150	286,50	317,00	309,75	306,62	282,84	280,55
180	286,50	317,00	310,00	306,87	283,34	280,55
210	287,00	317,00	309,50	306,62	283,59	280,55
240	286,25	316,75	308,75	306,62	283,59	281,30
270	286,00	316,25	309,00	306,87	283,59	281,30
300	287,50	317,25	312,51	306,87	283,59	280,80
Promedio	286,80	316,83	309,78	306,65	283,34	280,73

(Fuente: Propia)

Las temperaturas registradas se promedian para tener un valor referencial de temperatura y calcular las propiedades del refrigerante. Las propiedades se calculan usando Coolprop en el Excel.

Tabla 3. 27 Propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema

Propiedad	Estados					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	286,8	316,8	309,8	306,6	283,3	280,7
Presión [Pa]	594001,6	1265741,6	1265741,6	1265741,6	594001,6	594001,6
Entalpía [J/kg]	594099,7	626719,4	297457,8	288567,0	288567,0	583095,5
Entropía [J/kg.K]	2403,6	2391,3	1329,0	1300,1	1315,6	2364,8
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Con los estados definidos, se procede a calcular el calor de entrada y salida, el trabajo realizado por el compresor y el COP del sistema.

Tabla 3. 28 Resultados del ciclo evaluado con Cooling Cycle Tester

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	321782,9	J/kg
Calor de salida	355163,9	J/kg
Trabajo	39219,7	J/kg
COP	8,20	--

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador. El trabajo se realiza mediante compresión politrópica (Revisar cálculos manuales en el ANEXO XI)

Evaluación del equipo con ajustes de temperatura en CCT

En este caso no existe subenfriamiento del sistema, puesto que las tuberías del equipo se encuentran aisladas. Sin embargo, la temperatura de recalentamiento es necesaria ajustarla debido a que no se tiene acceso al evaporador (aire acondicionado) y la temperatura en la salida, tiene un cierto grado de recalentamiento.

La temperatura de recalentamiento se ajusta con respecto a la presión alcanzada en el manómetro de baja y su temperatura asociada al punto como gas saturado. Para calcular la temperatura se trabaja con la presión absoluta a la altura de Quito.

Tabla 3. 29 Temperatura de saturación del refrigerante según la presión de baja.

	Propiedad		
	Presión [Pa]	Calidad (x)	T. evaporador [K]
Valor	499456,41	1,00	274,84

(Fuente: Propia)

La temperatura de recalentamiento se configura hasta que la temperatura del estado ideal 5 (T5h) sea similar a la temperatura en el evaporador.

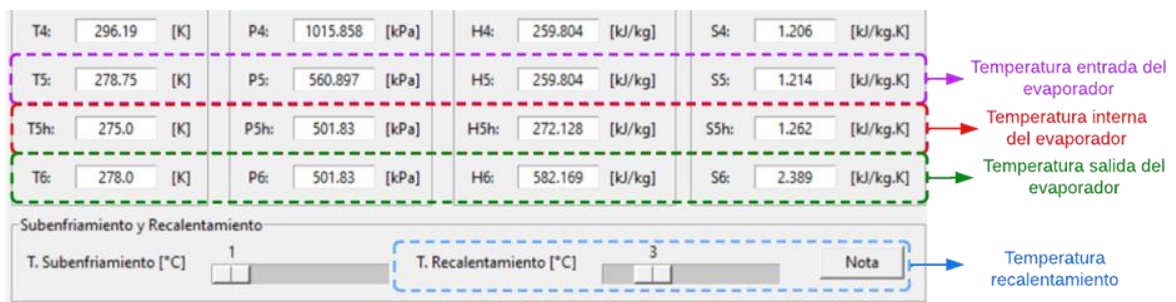


Figura 3. 13 Cooling cycle tester con ajuste en la temperatura de recalentamiento
(Fuente: Propia)

Con los ajustes realizados, se inicia la evaluación del equipo registrando los datos de temperatura cada 30 segundos en un periodo de cinco minutos. En este caso la temperatura de recalentamiento es de 3 °C

Tabla 3. 30 Temperaturas registradas usando Cooling Cycle Tester

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	282,98	307,14	301,46	295,96	278,50	278,75
60	282,98	307,14	300,96	295,96	278,50	278,75
90	283,73	307,89	301,46	296,21	278,25	278,50
120	283,98	307,64	301,21	296,45	278,25	278,50
150	283,48	307,64	301,21	296,70	278,25	278,50
180	283,98	307,64	300,96	296,45	278,25	278,50
210	283,98	307,64	300,96	296,21	278,25	278,50
240	283,48	307,89	300,96	296,45	278,25	278,50
270	283,73	307,39	300,72	296,45	278,25	278,50
300	283,98	307,89	301,21	296,70	278,50	278,75
Promedio	283,63	307,59	301,11	296,35	278,33	278,58

(Fuente: Propia)

El valor promedio de cada temperatura es el valor referencial para calcular las propiedades del refrigerante en los diferentes estados del sistema.

Tabla 3. 31 Propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	283,6	307,6	301,1	296,4	278,3	278,6
Presión [Pa]	495440,6	1025829,8	1025829,8	1025829,8	495440,6	495440,6
Entalpía [J/kg]	592337,2	616892,7	273202,9	260246,7	260246,7	580786,2
Entropía [J/kg.K]	2427,8	2392,1	1251,2	1207,8	1219,3	2366,8
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Al tener las propiedades definidas del refrigerante, se procede a calcular el calor de entrada y salida, el trabajo realizado por el compresor y el COP del sistema.

Tabla 3. 32 Resultados del ciclo evaluado con Cooling Cycle Tester

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	320539,5	J/kg
Calor de salida	356646,0	J/kg
Trabajo	41380,0	J/kg
COP	7,75	--

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador. . El trabajo se realiza mediante compresión politrópica (Revisar cálculos manuales en el ANEXO XI)

Evaluación del equipo según la instrumentación del equipo

Para registrar las temperaturas del equipo, primero se identifica cuáles de los ocho puntos de temperatura son adecuados para compararse con las temperaturas registradas por los seis termopares del Cooling Cycle Tester. Según la Figura 3. 12 las temperaturas T4 y T7 no son de interés. Las demás temperaturas se registran cada 30 segundos durante cinco minutos. Estas temperaturas son tomadas del sistema de control implementado en el equipo Split.

Tabla 3. 33 Registro de temperaturas según la instrumentación del equipo

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	282,65	314,40	303,40	297,15	274,90	276,90
60	282,40	314,15	303,90	297,40	274,90	276,90
90	281,90	314,65	304,65	298,15	275,70	277,15
120	282,40	314,65	304,40	298,65	275,15	276,65
150	282,40	314,40	304,40	297,90	275,15	276,90
180	282,15	314,90	304,90	298,65	275,15	276,90
210	281,65	314,40	305,15	298,65	275,40	276,40
240	281,90	314,40	305,40	298,90	275,15	277,15
270	281,65	314,90	305,40	298,40	275,65	277,15
300	281,90	314,40	305,40	298,40	274,90	276,90
Promedio	282,10	314,53	304,70	298,23	275,21	276,90

(Fuente: Propia)

Con el promedio de las temperaturas registradas, se calculan las propiedades del refrigerante para cada estado del sistema. El cálculo de las propiedades se realiza con Coolprop en Excel.

Tabla 3. 34 Propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	282,1	314,5	304,7	298,2	275,2	276,9
Presión [Pa]	499456,4	1119984,8	1119984,8	1119984,8	499456,4	499456,4
Entalpía [J/kg]	589482,2	627496,8	283067,2	265312,6	265312,6	580337,3
Entropía [J/kg.K]	2416,4	2412,5	1283,1	1224,2	1237,5	2383,7

(Fuente: Propia)

Al tener todas las propiedades del refrigerante, se calcula el calor de entrada y salida, el trabajo del compresor y el COP.

Tabla 3. 35 Evaluación del sistema usando la propia instrumentación del equipo

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	315024,7	J/kg
Calor de salida	362184,2	J/kg
Trabajo	54766,4	J/kg
COP	5,75	--

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador. . El trabajo se realiza mediante compresión politrópica (Revisar cálculos manuales en el ANEXO XI)

Error porcentual en el registro de temperaturas para cada caso

Es importante determinar el error porcentual de las temperaturas en el equipo, puesto que estas temperaturas son superficiales y no se encuentran aisladas del ambiente. Para ello el error porcentual se calcula según la ecuación (12).

Tabla 3. 36 Error porcentual en el registro de datos de temperatura

Denominación	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Referencial	282,10	314,53	304,70	298,23	275,21	276,90
Caso 1: Sin ajuste	283,63	306,96	300,79	296,55	278,50	280,23
Caso 2: Con ajuste	283,63	307,59	301,11	296,35	278,33	278,58
% Error						
Caso 1: Sin ajuste	0,54	2,40	1,28	0,56	1,20	1,20
Caso 2: Con ajuste	0,54	2,20	1,18	0,63	1,13	0,60

(Fuente: Propia)

Error porcentual para los procesos en cada caso de evaluación

El error porcentual para los procesos nos permite tener un grado de confiabilidad de equipo y los resultados calculados mediante el Cooling Cycle Tester.

Tabla 3. 37 Error porcentual para los diferentes casos realizados

Resultados	Calor de entrada [J/kg]	Calor de salida [J/kg]	Trabajo [J/kg]	COP
Equipo Instrumentado	315024,7	362184,2	54766,4	5,8
Cooling Cycle Tester sin ajuste	321782,9	355163,9	39219,7	8,2
Cooling Cycle Tester con ajuste	320539,5	356646,0	41380,0	7,7
% Error				
Cooling Cycle Tester sin ajuste	2,1	1,9	28,4	42,6
Cooling Cycle Tester con ajuste	1,8	1,5	24,4	34,7

(Fuente: Propia)

Diagrama T-s comparativo para cada caso de evaluación

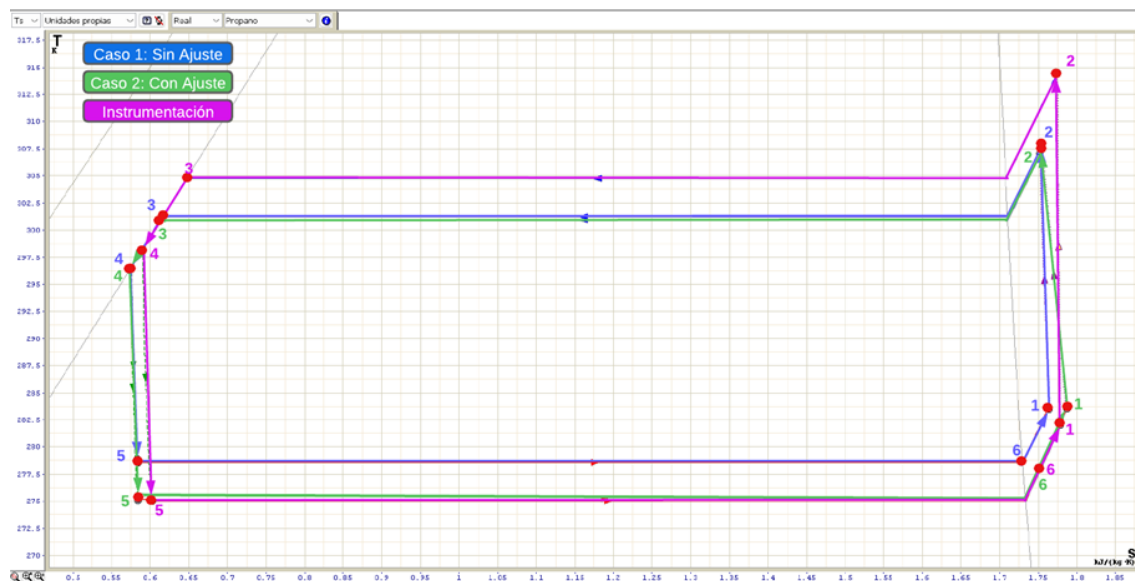


Figura 3. 14 Diagrama T-s para los diferentes casos de evaluación

(Fuente: Propia)

3.1.4. Prueba concluyente para los equipos evaluados

De acuerdo a las evaluaciones realizadas en el presente documento, se ha evidenciado que existe un error del 25 y 30% para todos los casos de estudio. Este error es observable en los diagramas T-s, donde se evidencia que el error se produce en el proceso de condensación. La temperatura que alcanza el proceso de condensación está asociada a la presión en cambio de fase, debido a que esta permanece constante en el proceso. Es

confiable esta temperatura, debido a que la presión es dominante dentro del sistema, en comparación con las temperaturas superficiales que evidencian una lectura correcta de los datos, pero no necesariamente es la que alcanza el refrigerante.

Para ajustar los resultados del CCT, se realiza un aumento de temperatura al proceso de condensación y el valor seleccionado es resultado de un cálculo matemático entre la diferencia de temperaturas medidas con el Cooling Cycle Tester (CCT) y la propia instrumentación del equipo. Las temperaturas por ajustarse son a la salida del compresor (T2) y a la salida del condensador (T3).

Según la Tabla 3. 38, la diferencia de temperatura para ambos estados se encuentra entre los 4 y 9 °C, acercándose la mayoría a los 5°C. Por motivos de conservación, se decide aumentar 5 °C a cada temperatura correspondiente a los estados 2 y 3. Este aumento de temperatura, se configura en el código de programación de Python y se realiza la evaluación nuevamente para todos los equipos.

Tabla 3. 38 Diferencia de temperatura para los estados 2 y 3 según instrumentación del equipo y CCT.

Caso	Temperatura registrada					
	Temperatura 2 (T2) [K]			Temperatura (T3) [K]		
	Instrum.	CCT	Delta Temp.	Instrum.	CCT	Delta Temp.
Equipo Chiller	319,1	313,0	6,1	294,0	294,3	0,3
Equipo de refrigeración FIM	316,2	307,3	8,9	310,2	304,3	5,9
Equipo Split	314,5	307,6	6,9	304,7	301,1	3,6

(Fuente: Propia)

Propiedades termodinámicas según el refrigerante de cada equipo

Tabla 3. 39 Propiedades calculadas para el Equipo Chiller (refrigerante R134a)

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	290,8	317,98	299,26	291,4	259,5	262,5
Presión [Pa]	159256,6	687659,1	687659,1	687659,1	159256,6	159256,6
Entalpia [J/kg]	417167,0	431776,7	236130,2	225040,7	390920,7	389199,8
Entropía [J/kg.K]	1839,8	1777,1	1125,2	1087,6	1744,3	1737,7
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Tabla 3. 40 Propiedades calculadas para el Equipo de Refrigeración del laboratorio de termodinámica (Refrigerante R134a)

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	280,0	312,3	309,3	294,4	275,4	276,7
Presión [Pa]	331959,7	916002,2	916002,2	916002,2	331959,7	331959,7
Entalpía [J/kg]	403671,7	421000,4	250720,5	229202,7	229202,7	400640,5
Entropía [J/kg.K]	1736,1	1722,9	1172,5	1101,2	1105,6	1725,2
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Tabla 3. 41 Propiedades calculadas para el Equipo Split (Refrigerante R290)

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	283,6	312,6	306,1	296,4	278,3	278,6
Presión [Pa]	495440,6	1159756,5	1159756,5	1159756,5	495440,6	495440,6
Entalpía [J/kg]	592337,2	621924,5	287092,5	260257,6	260257,6	580786,2
Entropía [J/kg.K]	2427,8	2389,4	1296,0	1206,9	1219,3	2366,8
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Evaluación de equipos de refrigeración

Tabla 3. 42 Resultados de evaluación para el Equipo Chiller

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	164159,14	J/kg
Calor de salida	206735,97	J/kg
Trabajo	21669,8	J/kg
COP	7,58	--

(Fuente: Propia)

Tabla 3. 43 Resultados de evaluación para el Equipo de Refrigeración del laboratorio de termodinámica

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	171437,8	J/kg
Calor de salida	191797,7	J/kg
Trabajo	19517,1	J/kg
COP	8,78	--

(Fuente: Propia)

Tabla 3. 44 Resultados de evaluación para el Equipo Split

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	320528,6	J/kg
Calor de salida	361666,9	J/kg
Trabajo	50114,9	J/kg
COP	6,40	--

(Fuente: Propia)

Error porcentual de resultados para los ciclos evaluados

Tabla 3. 45 Error porcentual en los resultados obtenidos con CCT en el Equipo Chiller

Resultado	Con ajuste de 5°C en el sistema de alta	Instrument.	%Error
Calor de entrada [J/kg]	164159,14	161927,50	1,38
Calor de salida [J/kg]	206735,97	206019,80	0,35
Trabajo [J/kg]	21669,77	24407,90	11,22
COP	7,58	6,63	14,26

(Fuente: Propia)

Tabla 3. 46 Error porcentual en los resultados obtenidos con CCT en el Equipo de Refrigeración

Resultado	Con ajuste de 5°C en el sistema de alta	Instrument.	%Error
Calor de entrada [J/kg]	161395,3	154417,40	4,52
Calor de salida [J/kg]	180016,2	177522,90	1,40
Trabajo [J/kg]	19396,0	24303,80	20,19
COP	8,32	6,40	30,02

(Fuente: Propia)

Tabla 3. 47 Error porcentual en los resultados obtenidos con CCT en el Equipo Split

Resultado	Con ajuste de 5°C en el sistema de alta	Instrument.	%Error
Calor de entrada [J/kg]	320528,63	315024,70	1,75
Calor de salida [J/kg]	361666,90	362184,20	0,14
Trabajo [J/kg]	50114,89	54766,40	8,49
COP	6,40	5,80	10,27

(Fuente: Propia)

3.2. Discusión

3.2.1. Discusión de resultados para el equipo Chiller

Análisis en cuanto a la comparativa de temperaturas para los tres casos

De acuerdo al porcentaje de error obtenido en la Tabla 3. 5, en primera instancia se observa que la temperatura a la salida del compresor tiene el mayor porcentaje de error para todos los casos. Este error es debido a que el flujo de aire ocasionado por el funcionamiento del ventilador del Chiller, enfría la superficie del tubo descubierto donde se ha ubicado el termopar para obtener los datos de temperatura. A este error también se añade la influencia de la temperatura ambiente y la tubería del manómetro. Se considera que la tubería del manómetro también influye, puesto que simula una aleta para mejorar la transferencia de calor hacia el ambiente.

Por otra parte, comparando la reducción del porcentaje en el error al usar aditamentos o aislamiento térmico, se observa que con la pasta térmica los resultados de temperatura mejoran y se acercan más a los datos proporcionados por el controlador de temperaturas del Equipo Chiller. Sin embargo, al usar aislamiento térmico, no existe gran diferencia con los resultados obtenidos usando pasta térmica. Además, se menciona que no siempre va a ser factible ubicar el aislamiento térmico para todos los termopares del equipo, debido a que la configuración del propio equipo no lo permite.

Basándose en los resultados obtenidos y el análisis realizado, las pruebas posteriores en diferentes equipos se realizaron implementando pasta térmica en los termopares y comparando los resultados obtenidos con respecto a la instrumentación propia de los equipos.

Análisis en la comparación de resultados finales de evaluación

De acuerdo a la Tabla 3. 14 el calor de entrada y salida calculado mediante el Cooling Cycle Tester (CCT), presenta un error bajo con respecto a los cálculos realizados según la instrumentación del Equipo Chiller. No obstante, el trabajo del compresor presenta un porcentaje de error del 31.17 y 27.37 % con respecto a los casos evaluados sin y con ajuste de temperatura respectivamente. El error para ambos casos es de consideración, puesto que, en gran parte, este proceso tiene relación directa con el consumo de energía eléctrica. Con realización al avance en las pruebas desarrolladas se buscará una solución para hacer que el trabajo del compresor calculados por el CCT sea de gran confiabilidad. Por otra parte, el COP presenta también un error en el resultado debido a que este se relaciona con el trabajo del compresor.

3.2.2. Discusión de resultados preliminares para el equipo de refrigeración del laboratorio de termodinámica FIM

Análisis del error porcentual en el registro de temperaturas para diferentes casos

De acuerdo a lo obtenido en la Tabla 3. 24, los resultados son favorables para el análisis realizado con el Cooling Cycle Tester sin ajuste. El error más grande para el caso 1 sin ajuste es de 2.83 %, y se encuentra en la temperatura registrada a la salida del compresor. Para el caso 2 con ajuste, la suposición de igualar la temperatura de subenfriamiento (T_4) a la temperatura ambiente, no es favorable para el proceso, puesto que este subenfriamiento aumenta en gran parte la cantidad de calor que ingresa en el evaporador y, por otro lado, el refrigerante tiene la capacidad suficiente de energía para fluir a través de las tuberías expuestas al ambiente sin que se pierda demasiada energía en el proceso. Se rechaza la idea de asumir en trabajos similares que la temperatura del condensador es la del ambiente puesto que esto no es factiblemente correcto.

Análisis del error porcentual para los procesos de evaluación de cada caso

Los resultados mostrados en la Tabla 3. 25 muestran errores altos, especialmente para el caso evaluado con el Cooling Cycle Tester con ajuste. Empezando con el calor de entrada y salida, el mayor error es de 11 % para el calor de entrada. Este calor de entrada es mayor, puesto que el subenfriamiento realizado hace que la entalpía sea menor como se muestra en la Figura 3. 10. Por otra parte, el mayor error en el trabajo del compresor es para el Cooling Cycle Tester sin ajuste, teniendo un valor del 37.6 %. Este error se debe a que la temperatura a la salida del compresor no alcanza el valor de temperatura registrado en los manómetros del equipo de refrigeración. Además, se añade que la temperatura a la salida del compresor y la del condensador son afectados por el flujo de aire resultante del ventilador.

3.2.3. Discusión de resultados preliminares para el equipo Split del laboratorio de termodinámica.

Análisis del error porcentual del registro de temperaturas para cada caso

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 3. 36 el error más grande para ambos casos es en la temperatura a la salida del compresor (T_2). Para el caso 1 y caso 2, el error es de 2.40 % y 2.20 %, respectivamente. El error en ambos casos puede ser ocasionado

por las condiciones ambientales, diferente geometría de las tuberías o a su vez por la ubicación del termopar en la línea de la tubería.

No obstante, el error en las demás temperaturas registradas es muy bajo comparado a las otras evaluaciones realizadas. El error es menor debido a que se utiliza la misma metodología de obtención de datos mediante temperaturas superficiales usado en el Split. Además, la ubicación de cada termopar del CCT es continuo a la instrumentación del Split.

Análisis del error porcentual para los procesos en cada caso de evaluación

A pesar de tener un error muy reducido en la comparación de temperaturas, según la Tabla 3. 37, el calor de entrada y salida tienen resultados satisfactorios al tener porcentajes de error reducidos. Sin embargo, para el trabajo de compresión en el caso 1 de la evaluación con el CCT sin ajuste, el error de 28.4 % muestra una desviación notoria con respecto a los valores reales. Este error se reduce al ajustar la temperatura de recalentamiento en el caso 2, llegando así a obtener un error del 24.4 % en el trabajo de compresión. Gráficamente, para cada caso en la Figura 3. 14, se puede observar en un diagrama T-s cuáles de los estados son los más influyentes para generar los errores en el cálculo de resultados.

3.2.4. Discusión de resultados concluyentes para los equipos evaluados

Con base al valor de 5 °C resultante de la Tabla 3. 38 y establecido para ajustar las mediciones en el sistema de alta, los nuevos resultados obtenidos se tabularon en la sección “Evaluación de equipos de refrigeración” y con esta prueba concluyente, se mostraron mejoras en los resultados. El ajuste beneficio especialmente al trabajo de compresión, reduciendo los errores que estaban en 25% a errores que rondan el 10%. Al tener una mejora en los resultados, se opta por conservar los 5 °C como temperatura de ajuste teniendo un valor conservativo para todos los casos evaluados y porque mantiene un margen de error en los resultados.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La revisión bibliográfica permitió conocer los métodos comúnmente utilizados para evaluar los sistemas de refrigeración mediante instrumentación invasiva. Esto resultó en la búsqueda de instrumentos que no requieren detener la operación del sistema o el empleo y fijación de acoples físicos extras en el equipo, para poder evaluar sus características funcionales.

El desarrollo final del equipo se fundamenta en principios termodinámicos para ciclos de refrigeración. Estos principios permiten resolver los problemas de compresión politrópica, entrada de calor en el evaporador, rechazo de calor en el condensador y cálculo del

coeficiente de desempeño. También se incluyen aproximaciones válidas como mantener presiones constantes en el intercambio de calor o considerar al refrigerante en sus estados de saturación. No se ha dejado de lado la parte experimental siendo esto sustancial para el análisis y validación de varias suposiciones consideradas para obtener resultados de las pruebas experimentales desarrolladas en el proyecto.

Se desarrolló un equipo didáctico portátil no invasivo para evaluar equipos de refrigeración de uso convencional. El equipo está asociado a una parte física caracterizándose por tener una carcasa protectora, un sistema electrónico, y sensores desmontables. La carcasa protectora es el resultado de una distribución apropiada de los componentes internamente como los conectores hembra de los termopares y la placa electrónica. Para diseñar la carcasa se utilizó el software Solidworks como programa de diseño 3D y para su conformación se utilizó la tecnología de impresión 3D. Por otra parte, los termopares desmontables llevan incorporados en sus extremos, un conector de termopar macho y una pinza diseñada para medir temperatura superficial en diferentes posiciones del ciclo de refrigeración.

Para la parte virtual se ha creado un archivo ejecutable que abre una interfaz gráfica que permite la conectividad mediante el Arduino del equipo físico a cualquier computador. No hay limitantes en los requerimientos del sistema para que se ejecute la interfaz gráfica. Esta interfaz gráfica se ha creado mediante programación en Python y se lo ha nombrado como Cooling Cycle Tester (CCT). La interfaz permite observar propiedades de refrigerantes, calcular resultados de procesos termodinámicos y dibujar diagramas de refrigeración en tiempo real. Los resultados son calculados para tres tipos de refrigerantes y en tres sistemas de unidades.

Los planos y la distribución de componentes se realizaron a partir de obtener el diseño espacial final en el software Solidworks. Posteriormente, con el módulo integrado en el software para desarrollar planos, se realizó el detallado del equipo protector, entre los cuales se desarrollaron dos planos de diseño para la base del equipo y para la tapa que recubre los componentes internos.

Para validar los resultados se realizaron pruebas en diferentes equipos de refrigeración de la EPN. Las pruebas preliminares con el CCT mostraron errores bajos en las temperaturas del sistema de baja y en los calores de entrada y salida del sistema. Las pruebas también mostraron que, en la mayoría de los casos, las temperaturas correspondientes al sistema de alta no alcanzan las temperaturas registradas por la propia instrumentación del equipo. Al no alcanzar los valores deseados, los resultados más afectados son el trabajo de compresión y el COP. Los resultados preliminares dan paso a un proceso necesario de ajuste en lo que resulta en las pruebas concluyentes.

El porcentaje de error para el trabajo de compresión y el COP según las pruebas preliminares, alcanzan el 25 y 40 % de error, respectivamente. Para solucionar y reducir el porcentaje de error en los resultados, mediante un análisis de diferencias de temperatura entre el CCT y la instrumentación de cada equipo, se establece un valor conservador que permite ajustar los resultados especialmente en el sistema de alta. Para ello se decidió realizar la prueba adicional o concluyente que consiste en aumentar 5°C a las temperaturas registradas en los estados 2 y 3 del equipo, logrando así obtener resultados satisfactorios que redujeron el error del trabajo de compresión de 25% a 10% y el COP de 40% a 15%. Con esto se valida que, mediante el uso de temperaturas superficiales, se puede evaluar un sistema de refrigeración teniendo resultados confiables y sin la necesidad de fijar acoples físicos al sistema de refrigeración que se evalúa. El ajuste concluyente se justifica ya que la temperatura medida es una temperatura superficial, la cual no corresponde a la temperatura de saturación a la presión del fluido.

El costo total de la elaboración del equipo es de \$387.47. Los rubros incluyen los costos referentes a la adquisición de los instrumentos para el prototipo inicial, el desarrollo de la placa PCB, la impresión 3D de la carcasa y pinzas, y accesorios que conforman el equipo final.

Se ha creado un manual de usuario y de manejo de la instrumentación portable el cual se encuentra en el ANEXO XIII. Aparte del manual de usuario, se ha creado una guía práctica para que el equipo se utilice en el laboratorio de termodinámica con fines didácticos.

4.2 Recomendaciones

Para la evaluación de cualquier sistema de refrigeración, asegúrese de que el equipo Cooling Cycle Tester este asentado en una base firme donde no se produzca movimiento por vibraciones de los equipos a evaluar.

Es necesario ubicar pasta térmica en los termopares para reducir los espacios de aire entre los alambres que conforman el termopar y la superficie de la tubería. Esto permite reducir el porcentaje de error con respecto a los resultados mostrados en la instrumentación propia de cada equipo. Hay que recordar que, al finalizar las pruebas se debe limpiar la pasta térmica del termopar y la superficie de las tuberías en el sistema de refrigeración.

Siempre verificar que los termopares no se crucen por elementos móviles como ventiladores, para evitar daños graves en cualquiera de los equipos. Además, donde se vayan a ubicar los termopares, limpiar cualquier recubrimiento superficial de la tubería mediante ayuda de elementos ásperos como lijas.

Para trabajos futuros se recomienda realizar pruebas experimentales en más equipos de refrigeración bajo la misma metodología, y determinar un valor más exacto en la

temperatura asumida para ajustar los resultados en el sistema de alta y mejorar la confiabilidad del equipo.

Referencias Bibliográficas

- [1] J. Keirstead, M. Jennings, and A. Sivakumar, "A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 3847–3866, 2012.
- [2] T. M. I. Mahlia and R. Saidur, "A review on test procedure, energy efficiency standards and energy labels for room air conditioners and refrigerator-freezers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 1888–1900, 2010.
- [3] C. A. Isaza Roldan and N. G. Jara, "Programas de Eficiencia Energética y Etiquetado en el Ecuador", *II Encuentro de tecnología e ingeniería*, no. July 2015, pp. 1–13, 2014.
- [4] S. Wongwises and N. Chimres, "Experimental study of hydrocarbon mixtures to replace HFC-134a in a domestic refrigerator," *Energy Convers Manag*, vol. 46, no. 1, pp. 85–100, 2005.
- [5] M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, and P. Chandrasekar, "Experimental investigation of R290/R600a mixture as an alternative to R134a in a domestic refrigerator," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, no. 5, pp. 1036–1042, 2009.
- [6] T. S. Pilla, P. K. G. Sunkari, S. L. Padmanabhuni, S. S. Nair, and R. S. Dondapati, "Experimental Evaluation Mechanical Performance of the Compressor with Mixed Refrigerants R-290 and R-600a," *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 113–121, 2017.
- [7] S. Bi, K. Guo, Z. Liu, and J. Wu, "Performance of a domestic refrigerator using TiO₂-R600a nano-refrigerant as working fluid," *Energy Convers Manag*, vol. 52, no. 1, pp. 733–737, 2011.
- [8] D. M. Álvarez Abad, "Evaluación de los impactos en el consumo de energía eléctrica asociados al uso de refrigeradores eficientes en el Ecuador: Programa Renova Refrigerador," Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [9] P. K. Bansal and R. Kriiger, "Test standards for household refrigerators and freezers I : preliminary comparisons Normes d ' essai pour les réfrigérateurs et les congélateurs domestiques I : comparaisons," *International Journal of Refrigeration*, 1995.
- [10] C. Aprea, A. Greco, and A. Maiorino, "An experimental investigation on the substitution of HFC134a with HFO1234YF in a domestic refrigerator," *Appl Therm Eng*, vol. 106, no. 2016, pp. 959–967, 2016.
- [11] J. F. Lou, H. Zhang, and R. Wang, "Experimental investigation of graphite nanolubricant used in a domestic refrigerator," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 1–9, 2015.
- [12] M. Fatouh and M. El Kafafy, "Experimental evaluation of a domestic refrigerator working with LPG," *Appl Therm Eng*, vol. 26, no. 14–15, pp. 1593–1603, 2006.
- [13] M. Y. Taib, A. A. Aziz, and A. B. Alias, "Performance Analysis of a Domestic Refrigerator," *Mechanical Engineering*, vol. 9501, no. May, pp. 320–325, 2010.
- [14] T. Coumaressin, K. Palaniradja, R. Prakash, and V. V. Kumar, "Experimental Analysis of Vapour Compression Refrigeration System using Al₂O₃/CuO-R134a Nano Fluid as Refrigerant," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 3, no. 16, pp. 1–5, 2015.
- [15] N. Subramani and M. Prakash, "Experimental studies on a vapour compression system using nanorefrigerants," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 3, no. 9, pp. 95–102, 1970.
- [16] C.-S. Jwo, L.-Y. Jeng, T.-P. Teng, and H. Chang, "Effects of nanolubricant on performance of hydrocarbon refrigerant system," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 27, no. 3, p. 1473, 2009.

- [17] M. A.; Sattar, R.; Saidur, and M. H.H., "Performance Investigation of Domestic Refrigerator Using Pure Hydrocarbons and Blends of Hydrocarbons as Refrigerants," *International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering*, vol. 1, no. 2014, pp. 66–69, 2014.
- [18] N. Jara, F. Reinoso, C. Isaza, L. Jara, Á. Aguinaga, and T. Moreno, "Instrumentación de un refrigerador doméstico para el análisis del comportamiento de las variables de Presión y Temperatura de Operación," *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, vol. 18, no. 1390–1869, pp. 1–17, 2017.
- [19] B. F. Castillo Cabrera and P. R. F. Germán, "Estudio Termodinámico de un Sistema de Refrigeración Frost con R600a," Universidad Politécnica Salesiana, 2014.
- [20] L. E. Buenaño Sánchez and R. M. Esparza Montero, "Diseño y Construcción de un Sistema de Refrigeración de conservación para laboratorio," Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2010.
- [21] G. Barletta and O. Acevedo, "Buenas prácticas en los procesos de instalación y mantenimiento de sistemas de refrigeración y aire acondicionado," *Ministerio de producción, comercio, inversiones y pesca del Ecuador*, p. 127, 2021.
- [22] ASHRAE, "Designation and Safety Classification of Refrigerants," *ANSI/ASHRAE Standard 34-2019*, no. 34, pp. 1–52, 2019.
- [23] Embraco, "R290 Y R600a," *Club de refrigeración*, 2017. <https://refrigerationclub.com/es-es/r290-y-r600a/> (accessed Apr. 19, 2022).
- [24] Gasservel, "FICHA TÉCNICA R-600a (Isobutano)," *Gas Servel S.A.*, 2022. www.gas-servei.com (accessed Apr. 19, 2022).
- [25] Gasservel, "FICHA TÉCNICA R-134a," *Gas Servel S.A.*, 2022. www.gas-servei.com (accessed Apr. 19, 2022).
- [26] Tecumseh, "Propano (R290) refrigerante natural," *Tecumseh*, pp. 1–16, 2019.
- [27] D. I. Cedeño Barreto, "Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Cocción de Atún usando un Detector de Temperatura Resistiva (Rtd) como instrumentos de Medición de Temperatura para una Empresa Empacadora de Atún en la ciudad de Manta," Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [28] Fluke-Calibration, "Nociones básicas de los termopares," *Melezzxa*, 2015.
- [29] C. Rangel Romero, J. C. Rojas Garnica, L. A. Rodríguez Serrano, and D. Rangel Taseca, "Análisis termodinámico de un ciclo de refrigeración real con refrigerante R-134a para la obtención de un COP óptimo de operación," *Artículo Revista de Sistemas Experimentales*, vol. 4, no. 11, pp. 53–60, 2017.
- [30] J. M. Belman Flores, "Desarrollo de un modelo físico para una instalación de producción de frío por compresión de vapor utilizando el refrigerante R134a. Validación experimental y aplicación para la simulación energética.," Universitat Jaume, 2008.
- [31] S. Medrano, "Termómetro de resistencia de Platino," *La Guía MetAs*, pp. 1–4, 2002.
- [32] B. Bidea, "Termómetros," *Gesa*.
- [33] Maxim Integrated Inc., "Sensor Ds18B20," *Maxim Integrated Products*, vol. 92, no. 1 (35), pp. 1–20, 2019.
- [34] E. C. Vallejo Coral, "Recuperación y readecuación de equipo de refrigeración del Laboratorio de Termodinámica de la Escuela Politécnica Nacional," Escuela Politécnica Nacional, 2011.
- [35] J. M. Joaristi, "DATA LOGGER (Registrador de datos)," *JM Industrial Technology S.A. de C.V.*, no. 55, p. 2, 2014.

- [36] Y. Fernández, “Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno,” *Xataka*, 2020. <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno> (accessed Apr. 27, 2022).
- [37] M. Moreno, “Controlador lógico programable (PLC),” *Automación Micromecánica s.a.i.c.* Buenos Aires, Argentina.
- [38] M. Ruiz Guti, “Manual de Programación Arduino,” *Arduino Notebook*, vol. 1, pp. 3–70, 2007.
- [39] H. D. Páez Logreira, R. Zamora Musa, and J. Bohórquez Pérez, “Programación de Controladores Lógicos (PLC) mediante Ladder y Lenguaje de Control Estructurado (SCL) en MATLAB,” *Revista Facultad De Ingeniería*, vol. 24, no. 39, p. 109, 2015.
- [40] M. C. Albornoz, M. Berón, and G. A. Montejano, “Interfaz gráfica de usuario: el usuario como protagonista del diseño,” *XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2017, ITBA, Buenos Aires)*, pp. 570–574, 2017.
- [41] H. Lastre and I. Sochimilica, “Desarrollo de un Software Didáctico para el Diseño de Plantas de Refrigeración de Gas Natural con Propano,” Universidad Industrial de Santander, 2017.
- [42] G. Romero Garcia, J. Cardenas Gutierrez, and E. Espinel, “An innovative interactive educational software on refrigeration systems to support virtual thermodynamic Class,” *Journal of Xi’an University of Architecture & Technology*, vol. XII, no. VII, pp. 54–63, 2020.
- [43] PyPI, “PyPI · The Python Package Index,” *PyPI*, 2020. <https://pypi.org/> (accessed Aug. 01, 2022).
- [44] I. Bell, “Welcome to CoolProp — CoolProp 5.1.1 documentation,” 2015. <http://coolprop.sourceforge.net/>
- [45] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, Séptima. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [46] Parker Hannifin Corporation, “Uso de la tabla P-T como herramienta de servicio,” *Parker Hannifin Corporation*, p. 8, 2011.
- [47] J. Hernández Valadez, *Manual de refrigeración doméstica*, Segunda., vol. 1. México: Editorial Trillas, 1988.
- [48] C. Riba, *Diseño concurrente*, Primera ed. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.
- [49] Epitech, “¿Cuántos lenguajes de programación existen?,” *Epitech*, Jan. 04, 2021. <https://www.epitech-it.es/cuantos-lenguajes-existen/> (accessed Aug. 01, 2022).
- [50] A. Lázaro, “Mejores software de programación,” *Profesional review*, Nov. 09, 2019. <https://www.profesionalreview.com/2019/11/09/mejores-software-programacion/> (accessed Aug. 01, 2022).
- [51] G. Van Rossum and F. L. Drake, “Python Tutorial,” *Python Software Foundation*, pp. 1–136, 2012.
- [52] A. Cadenas, “Recalentamiento en Sistemas Frigoríficos,” *Amrandado*, Jan. 29, 2020. <https://blogsaverroes.juntadeandalucia.es/amrandado/recalentamiento-en-sistemas-frigorificos/> (accessed Aug. 10, 2022).
- [53] H. F. Zúñiga Puebla, “Modelación termodinámica y optimización energética de un ciclo de refrigeración por absorción difusión,” Instituto tecnológico y de estudios superiores de Monterrey, 2017.

Anexos

ANEXO I.

Pruebas experimentales para el compresor

En el compresor se realizaron dos pruebas para medir el efecto de la temperatura del compresor hacia los tubos de absorción y descarga. A base de esto, se procede a dividir las pruebas en:

- Pruebas en el compresor y el tubo de absorción
- Pruebas en el compresor y el tubo de descarga

Para cada caso, se han usado cuatro termopares, las cuales se han distribuido dos para la carcasa del compresor y dos para los tubos correspondientes.

Instrumentos y materiales utilizados

Para medir las temperaturas, se utilizó un microcontrolador Arduino MEGA 2560 al cual se le acoplaron termocuplas con sus respectivos convertidores de señal. Los módulos convertidores de señal tienen la codificación MAX6675, los cuales tienen la capacidad de medir rangos de temperatura de 0 °C a 1024 °C.

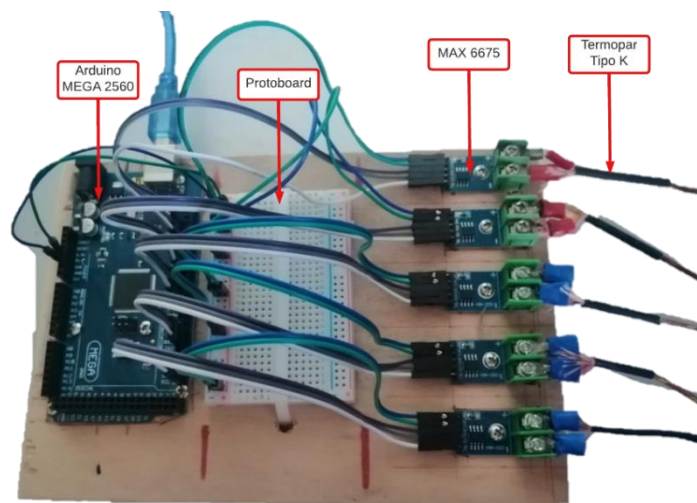


Figura I. 1 Prototipo para medición de temperaturas
(Fuente: Propia)

Además, para el registro de datos se usó la aplicación CoolTerm el cual permite registrar los datos en un tiempo determinado y posterior a ello los guarda en un archivo de texto. El tiempo de prueba fue de 1 hora con 10 minutos. El tiempo implementado incluye tres fases, reposo, arranque y operación. Para una mejor lectura de datos, se ha optado por usar pasta térmica de la marca "Thermal Grease" la cual tiene una conductividad térmica mayor a 3,7 W/m-k.

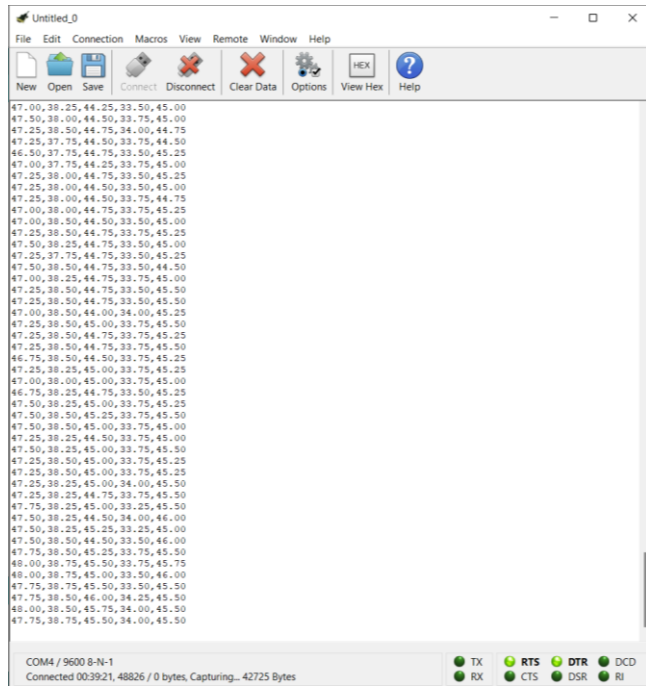


Figura I. II Interfaz gráfica del programa CoolTerm
(Fuente: Propia)

Instalación de termopares.

Para ubicar los termopares, se decidió aplicar la técnica establecida en [53] donde los termopares forman un circuito cerrado con la superficie del tubo y no se opta por obtener una temperatura puntual al soldar o unir los termopares. Esta técnica es comprobada en [53] al comparar los resultados obtenidos con un termopar calibrado Omega SA1XL-K-72 y el termopar abierto, obteniendo un error de 0.31 % entre ambos instrumentos de medición.

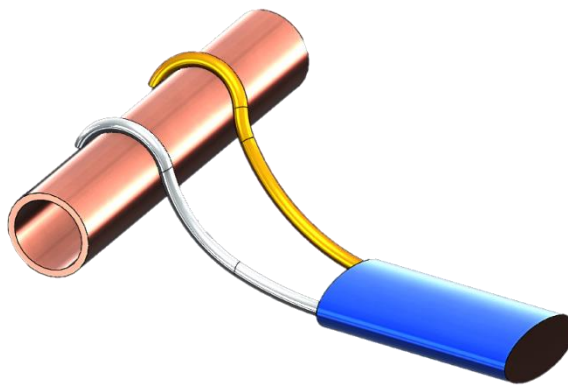


Figura I. III Ejemplo de ubicación de termopares en las tuberías
(Fuente: Propia)

Ubicación de termopares para las pruebas

- Ubicación de termopares en el compresor y tubo de absorción

La Figura I. IV es un esquema de la ubicación de los termopares para realizar la toma de datos. La ubicación de los termopares en la carcasa están distanciados 2 cm aproximadamente, de la tubería de absorción. La separación de los termopares 3 y 4 es de 3 cm.



Figura I. IV Esquema de ubicación de termocuplas en el compresor y tubo de absorción
(Fuente: Propia)



Figura I. V Ubicación de termocuplas de manera física en el compresor y el tubo de absorción
(Fuente: Propia)

- Ubicación de termopares en el compresor y tubo de descarga

La Figura I. VI muestra un esquema de la ubicación de los termopares de donde se obtendrá la información. Similar a la prueba en el tubo de absorción, se ubican 2 termopares en la carcasa del compresor a una distancia aproximada de 2 cm. Los otros dos termopares se ubican en el tubo de descarga, manteniendo una separación entre los mismos de 2 cm.



Figura I. VI Esquema de ubicación de termopares en el compresor y tubo de descarga
(Fuente: Propia)

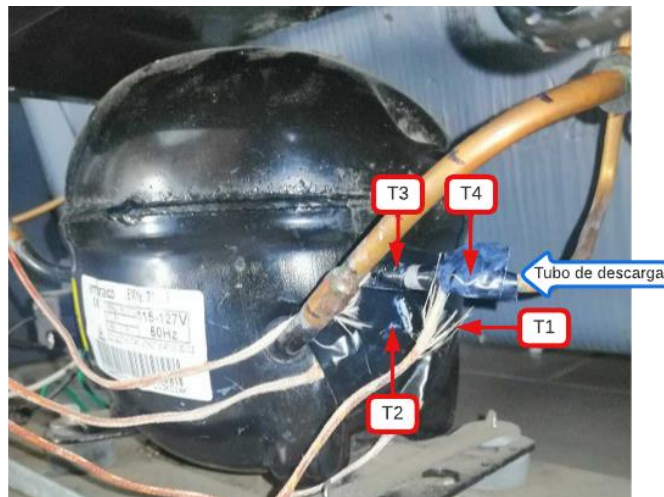


Figura I. VII Ubicación de termopares de manera física en el compresor y tubo de descarga
(Fuente: Propia)

- Ubicación de termopares para el tubo de absorción

En el tubo de absorción se usaron 5 termopares para registrar los datos, ubicando el primer termopar a 4 cm de la carcasa del compresor y los siguientes a 2 cm cada uno.

- Termopar 1: 4 cm
- Termopar 2: 6 cm
- Termopar 3: 8 cm
- Termopar 4: 10 cm
- Termopar 5: 12 cm

Un esquema de ubicación de los termopares en el tubo de absorción se realizó en *SolidWorks* para un mejor entendimiento.

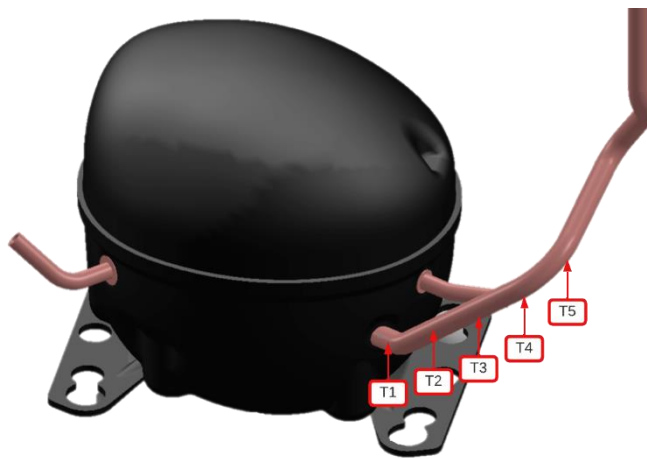


Figura I. VIII Esquema espacial de ubicación de termopares en el tubo de absorción
(Fuente: Propia)

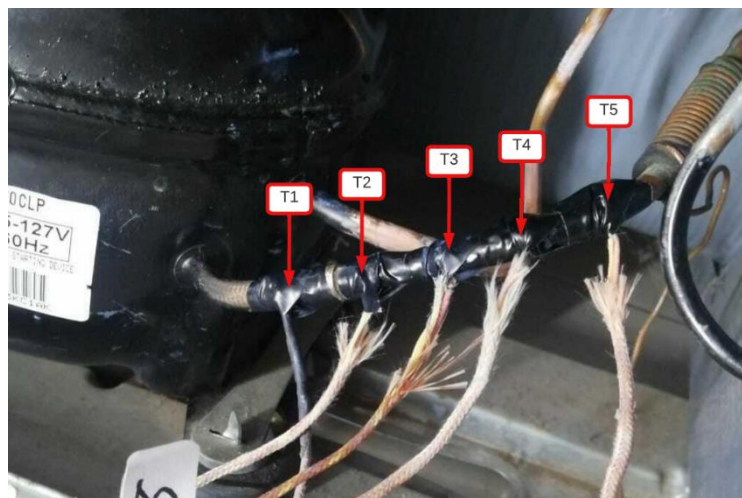


Figura I. IX Esquema físico de ubicación de termopares en el tubo de absorción
(Fuente: Propia)

- Ubicación de termopares para el tubo de descarga

Para la toma de datos en el tubo de descarga, se usaron 5 termopares ubicados a las siguientes distancias:

- Termopar 1: 3 cm
- Termopar 2: 6 cm
- Termopar 3: 9 cm
- Termopar 4: 12 cm
- Termopar 5: 16 cm

Se presenta un esquema espacial realizado en *SolidWorks* para la ubicación de cada termopar.

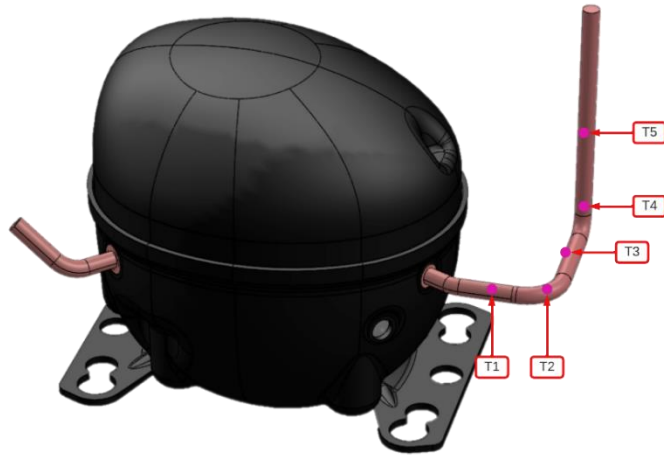


Figura I. X Esquema espacial de ubicación de termopares en el tubo de descarga
(Fuente: Propia)

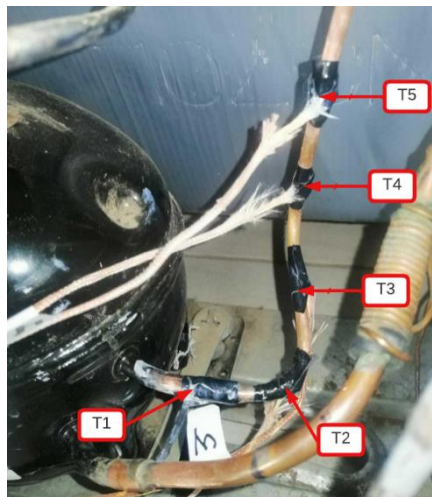


Figura I. XI Ubicación física de termopares en el tubo de descarga.
(Fuente: Propia)

Resultados de las pruebas

- Resultados para la prueba realizada en el compresor y el tubo de absorción

Posterior al registro de los datos, estos se procesaron en una hoja de cálculo de Excel, y se mostraron los siguientes resultados.

De acuerdo a la Figura I. XII, se puede observar que el compresor al encontrarse en reposo se mantiene a una temperatura alrededor de los 30 °C. En la fase de arranque del compresor, en el lado de la tubería de absorción, existe una caída de temperatura cercana a los 0 °C. Esto se debe a que en ese instante el refrigerante transfiere la temperatura con la que sale del evaporador y se estanca en la entrada del compresor. Posterior al arranque, las temperaturas empiezan a tener una tendencia estable después que hayan transcurrido 200 segundos. Posterior a que se estabilizan las temperaturas, se observa que la temperatura en el compresor es creciente en el tiempo que se encuentra operando, e

incluso el incremento de temperatura afecta a las temperaturas cercanas al compresor, como son las temperaturas registradas en el tubo de absorción (T3 y T4). Sin embargo, al encontrarse el termopar T4 más distanciado del compresor, hay una mayor caída de temperatura.

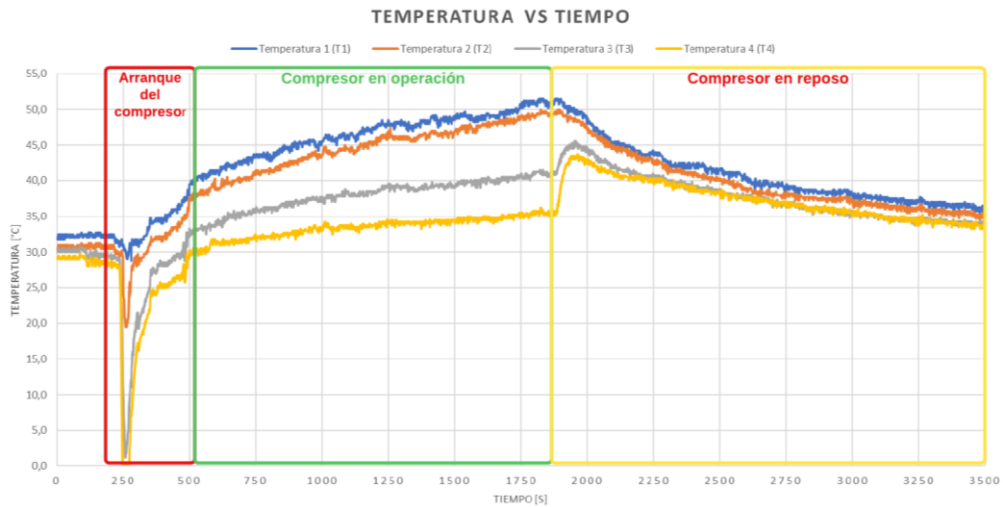


Figura I. XII Diagrama de temperatura vs tiempo en el compresor y tubo de absorción (Fuente: Propia)

Claramente, se puede observar que la temperatura alcanzada por el compresor afecta a la tubería de absorción, y esto se lo evidencia una vez que el compresor deja de trabajar y entra en reposo. Las temperaturas 3 y 4 tienden a incrementarse drásticamente, hasta llegar a un equilibrio térmico donde se da un descendimiento de temperatura similar al enfriamiento del compresor.

- Resultado para la prueba realizada en el compresor y el tubo de descarga

Los datos registrados se procesan manualmente en una hoja de cálculo, y los resultados son los siguientes:

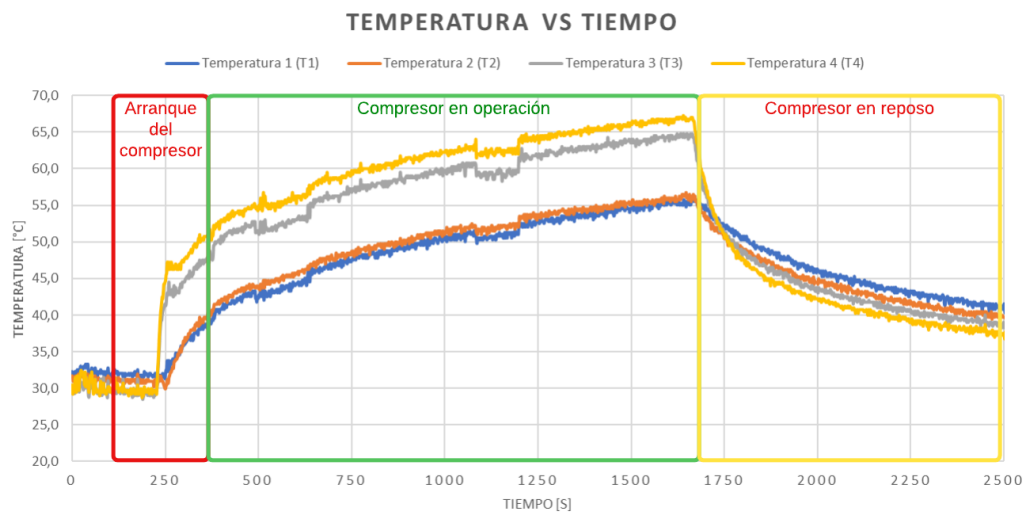


Figura I. XIII Diagrama temperatura vs tiempo en el compresor y tubo de descarga (Fuente: Propia)

La Figura I. XIII abarca tres fases del compresor, arranque, estado en operación y reposo. En el arranque inicial del compresor, se puede observar que las temperaturas 3 y 4 tienen una elevación drástica de temperatura, en comparación a las ubicadas en la carcasa del compresor. Esto es evidente, ya que, por el tubo de descarga, pasa el refrigerante a una temperatura con sobrecalentamiento. Cuando el compresor se encuentra operando, el efecto de la temperatura elevada del refrigerante si afecta a las cercanías del tubo de descarga. Esto se puede corroborar con las temperaturas registradas en el tubo de absorción. Por otro lado, se puede observar que, en las fases de arranque y operación, la temperatura 4 es predominante a la temperatura 3 todo el tiempo. La temperatura 3 no puede elevarse más que la temperatura 4, puesto que existe un equilibrio térmico entre la temperatura del refrigerante y la temperatura del compresor, por ende, mientras más distante este la temperatura 4 del compresor, se obtendrá la temperatura a la que se encuentra el refrigerante.

Al apagarse el sistema para entrar en reposo, las temperaturas 3 y 4 tienen una caída repentina hasta llegar a igualarse con la temperatura alcanzada por el compresor.

Considerando que la temperatura 4 es superior a la temperatura 3, se mencionó que mientras más distante la temperatura 4 este del compresor, se tiene una lectura de la temperatura que alcanza el refrigerante. Considerando este efecto, se ha visto en la necesidad de realizar una prueba para determinar la distancia adecuada donde el refrigerante alcance su máximo valor de temperatura previo a transferir energía hacia el ambiente.

- Resultado para la prueba en el tubo de absorción

Los resultados en el tubo de absorción son los siguientes:

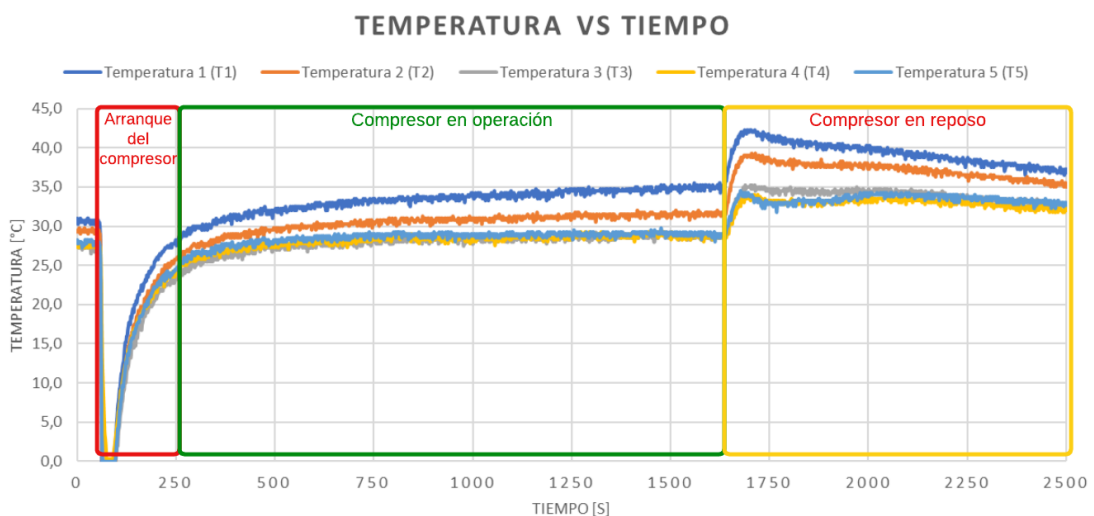


Figura I. XIV Diagrama temperatura vs tiempo para el tubo de absorción
(Fuente: Propia)

En la fase de operación del compresor, se puede observar que la temperatura tiende a ser constante para los termopares más alejados del compresor, correspondiendo a las temperaturas 3, 4 y 5. Según la Figura I. XIV, estas temperaturas se sobrepone entre ellas en todo el proceso de operación del sistema. Gráficamente con los datos registrados y a las distancias que se encuentran los termopares, se puede obtener una tabla con la siguiente información.

Tabla I. I Comparativa de temperatura con relación a su distancia para los termopares en el tubo de absorción

	Distancia [cm]	Temperatura [°C]
T1	4,00	34,70
T2	6,00	31,43
T3	8,00	28,71
T4	10,00	28,74
T5	12,00	28,99

(Fuente: Propia)

Para obtener la temperatura, se procedió a promediar las temperaturas registradas en el periodo de 1250 a 1640 segundo, donde la temperatura alcanza sus valores máximos previo a que el sistema entre en reposo. Por consiguiente, de acuerdo con la Tabla I. I, se puede graficar la temperatura versus la distancia, ilustrando el proceso que se da en el trayecto del tubo de absorción.

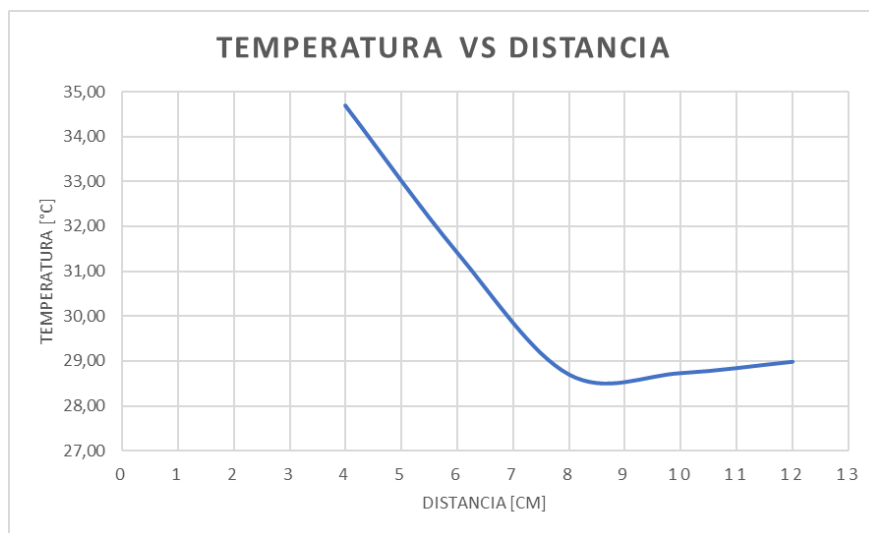


Figura I. XV Diagrama de temperatura vs distancia para el tubo de absorción

(Fuente: Propia)

Según el diagrama de la Figura I. XV, la temperatura tiene a descender mientras más lejos el sensor se encuentre del compresor. Sin embargo, existe un punto mínimo donde posteriormente la temperatura vuelve a incrementarse levemente. Esto se debe a que, por cuestiones de mejoras en el sistema, parte del tubo capilar se enrolla en el tubo de absorción, produciendo un pequeño sobrecalentamiento en esta zona. Por ende, según los

resultados encontrados, una distancia prudente donde se puede ubicar un sensor para medir la temperatura del refrigerante es entre 8 y 9 cm alejados del compresor.

- Resultado para la prueba en el tubo de descarga

Los resultados para la prueba en el tubo de descarga son los siguientes:

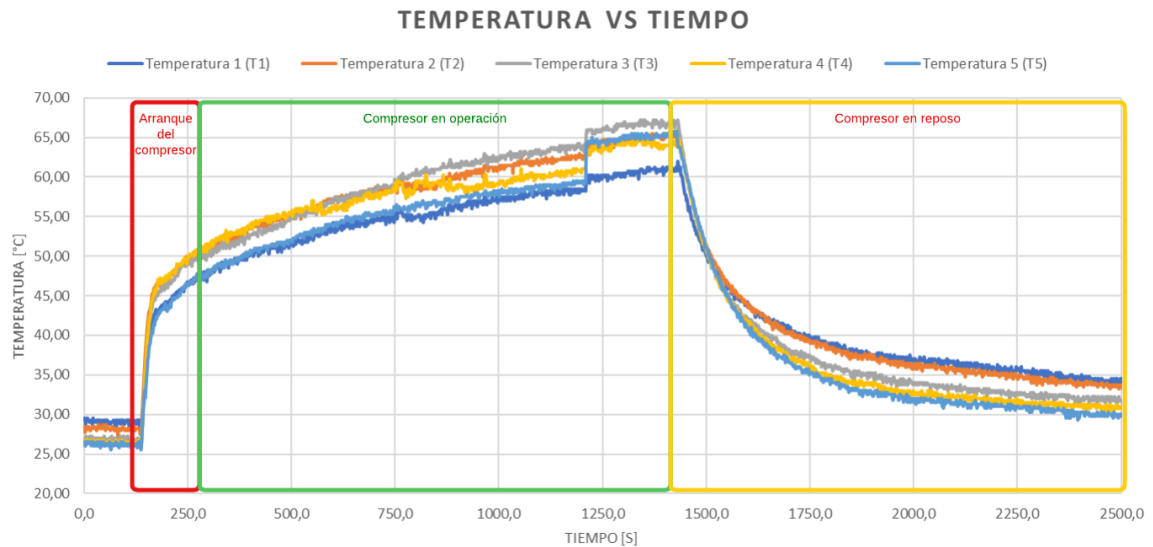


Figura I. XVI Diagrama temperatura versus tiempo para el tubo de descarga
(Fuente: Propia)

La zona de interés para esta prueba es la del compresor en operación. Al analizar la Figura I. XVI, la temperatura 3 es predominante en el sistema, con esto se puede decir que efectivamente existe punto máximo donde el refrigerante alcanza un valor máximo. Según la distancia a la que se encuentra cada termocupla, se realiza un promedio de temperatura en el intervalo de 1000 a 1200 segundos donde la temperatura tiende a mantener un incremento estable, presentando el siguiente resultado.

Tabla I. II Comparativa de temperatura con relación a su distancia para los termopares

	Distancia [cm]	Temperatura [°C]
T1	3,00	57,85
T2	6,00	62,01
T3	9,00	63,25
T4	12,00	60,11
T5	16,00	58,69

(Fuente: Propia)

Los resultados de la Tabla I. II se los grafica para un mejor entendimiento del suceso.

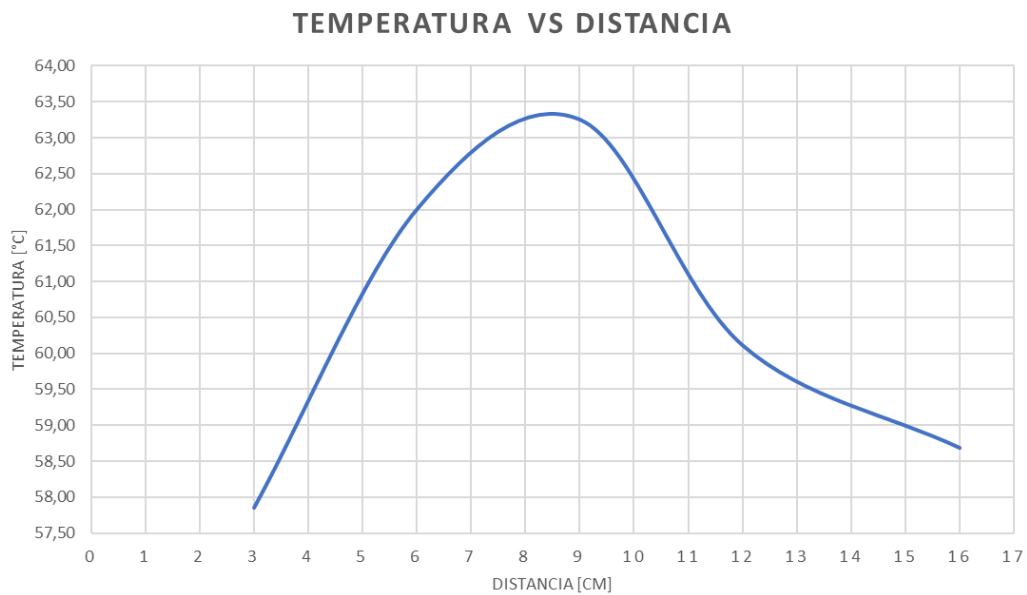


Figura I. XVII Diagrama temperatura vs distancia para el tubo de descarga.

(Fuente: Propia)

La Figura I. XVII muestra un comportamiento parabólico donde la temperatura llega a ser máxima, a una cierta distancia. Para el caso de estudio el rango de distancia para la ubicación del sensor de temperatura está entre 8 a 9 cm, esto según las pruebas realizadas y los resultados presentados.

ANEXO II

Pruebas en el condensador

Las pruebas en el condensador consisten en determinar un lugar adecuado en el condensador donde la temperatura se mantenga prácticamente constante según la teoría.

Para alcanzar este objetivo, se ha utilizado el mismo prototipo de medición de temperaturas, el cual se ha detallado en el Anexo I. Además, la colocación de los termopares para registrar la temperatura por la superficie de las tuberías es la misma utilizada para las pruebas en el compresor.

Geometría del condensador

Para un mejor entendimiento de las pruebas en el compresor, se ha desarrollado en AutoCAD, la geometría del condensador con las medidas principales.

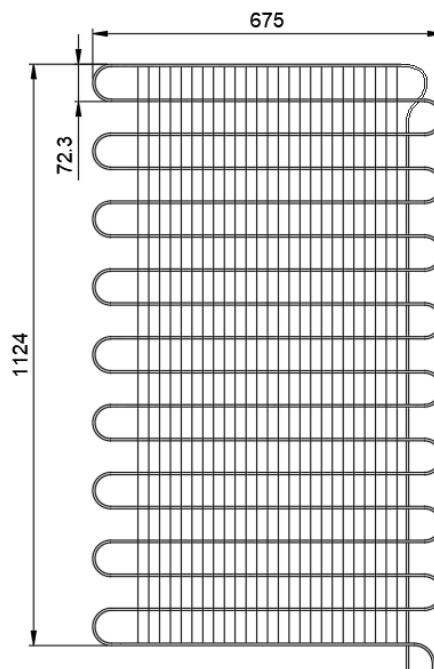


Figura II. I Geometría del condensador

(Fuente: Propia)

Debido a la limitante de tener 5 termopares para registrar las temperaturas, las pruebas se han realizado en 4 tramos según el esquema de la Figura II. II.

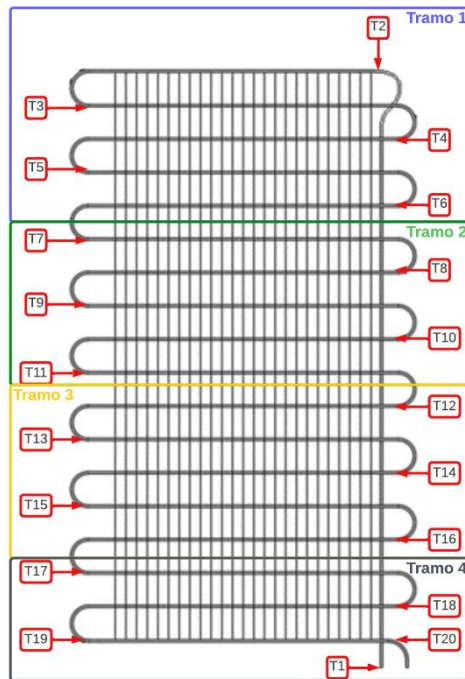


Figura II. II Ubicación de termopares y tramos para realizar las pruebas en el condensador
(Fuente: Propia)

Ubicación de termopares y pruebas de monitoreo

Como se puede observar en la Figura II. II, se tienen 20 puntos de medición, los cuales están distribuidos 5 en cada tramo. Los puntos de medición son en los tramos finales de cada espiral. Basándose en cada prueba, se muestra físicamente la ubicación de cada tramo para la toma de datos.

- Tramo 1



Figura II. III Ubicación de termopares en el tramo 1
(Fuente: Propia)

- Tramo 2

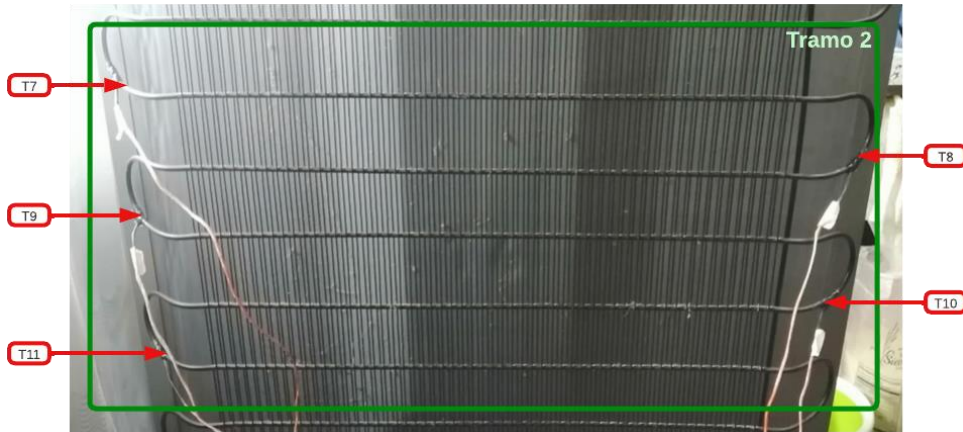


Figura II. IV Ubicación de termopares en el tramo 2
(Fuente: Propia)

- Tramo 3

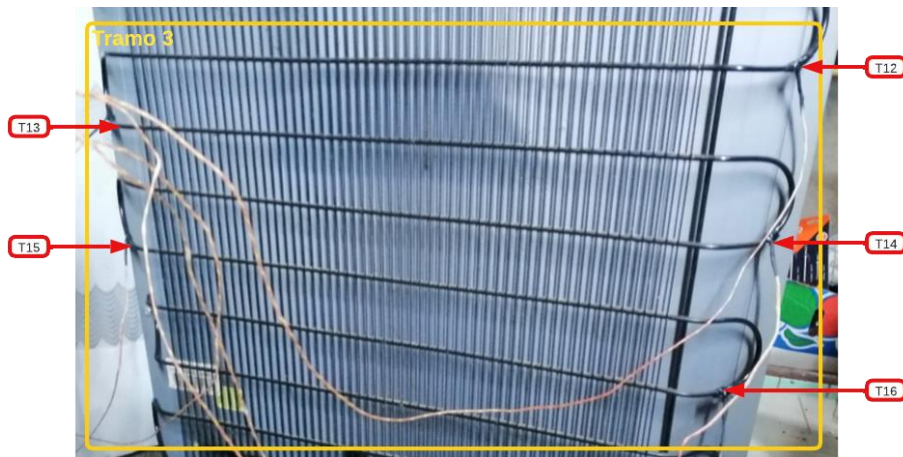


Figura II. V Ubicación de termopares en el tramo 3
(Fuente: Propia)

- Tramo 4

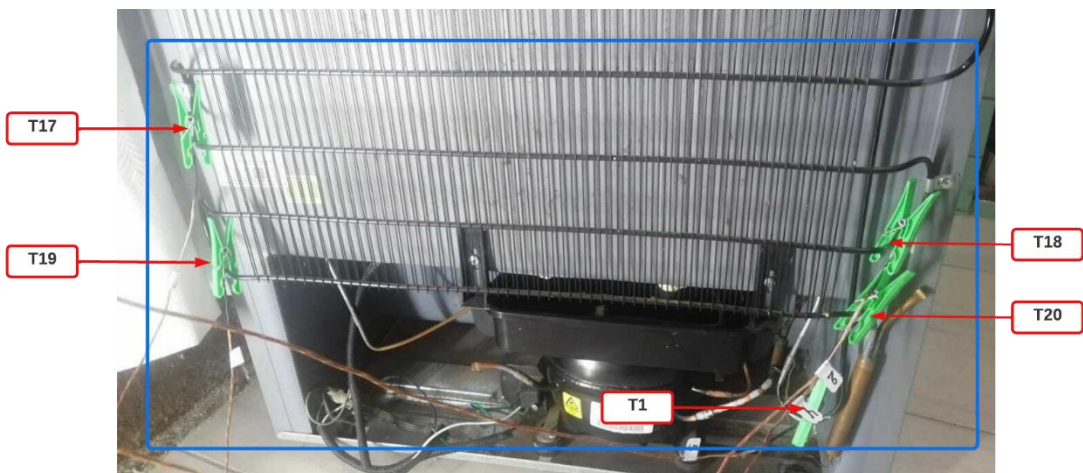


Figura II. VI Ubicación de termopares en el tramo 4
(Fuente: Propia)

Resultados de las pruebas

Los resultados de las pruebas se muestran para cada tramo analizado debido a que no son realizados en el mismo tiempo. Además, para un mejor entendimiento de los resultados, estos se han promediado cada 20 valores según la opción de línea de tendencia “Media móvil”.

- Tramo 1

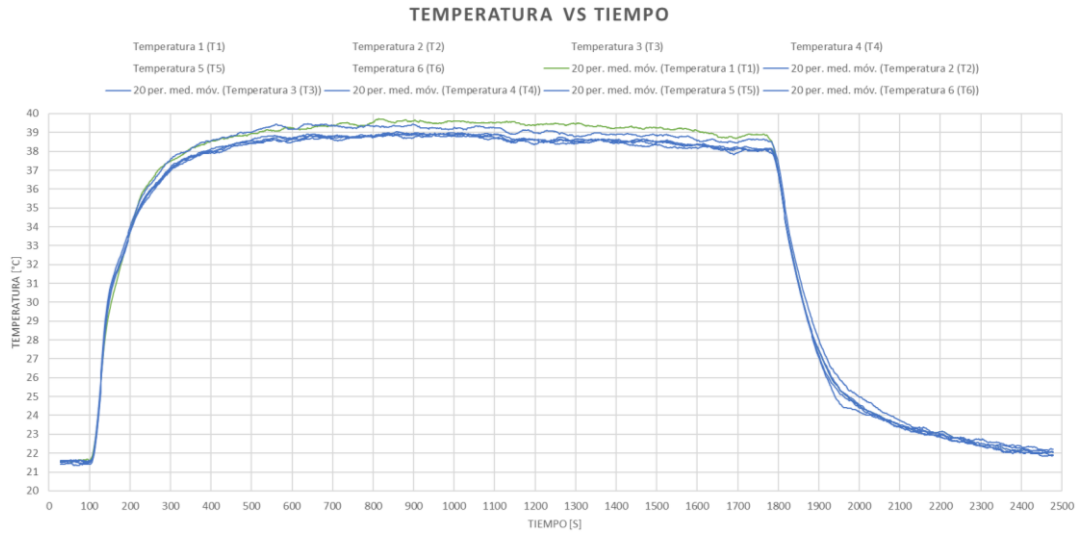


Figura II. VII Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 1
(Fuente: Propia)

- Tramo 2

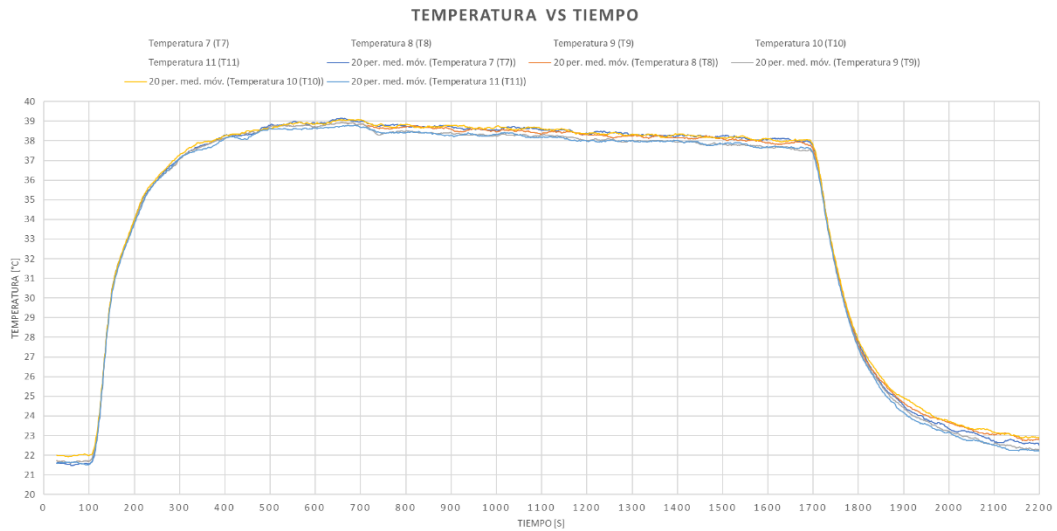


Figura II. VIII Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 2
(Fuente: Propia)

- Tramo 3

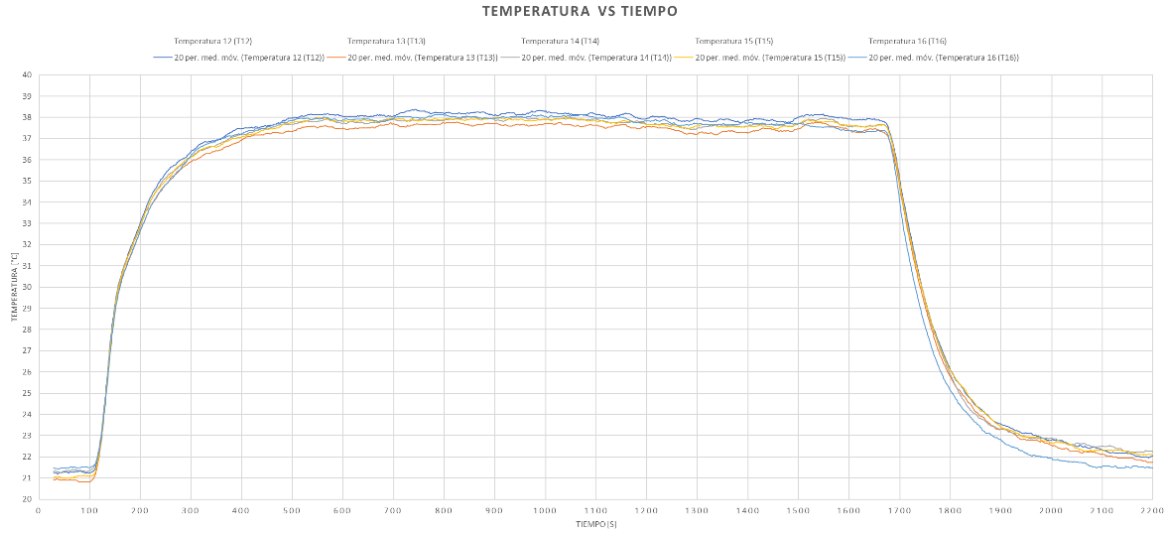


Figura II. IX Diagrama de temperatura vs tiempo para el tramo 3
(Fuente: Propia)

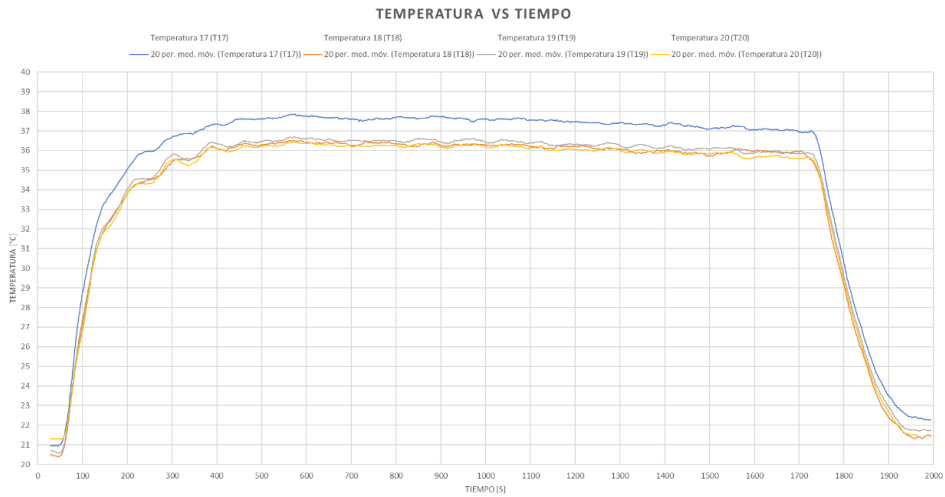


Figura II. X Diagrama temperatura vs tiempo para el tramo 4
(Fuente: Propia)

Resumen de datos

Tabla II. I Resumen de datos obtenidos en el condensador

	T1	T2	T3	T4	T5
Temperatura [°C]	38,83	38,56	38,07	38,17	38,16
	T6	T7	T8	T9	T10
Temperatura [°C]	38,15	38,10	37,95	37,71	38,08
	T11	T12	T13	T14	T15
Temperatura [°C]	37,74	37,96	37,54	37,72	37,70
	T16	T17	T18	T19	T20
Temperatura [°C]	37,45	37,06	35,96	35,90	35,65

(Fuente: Propia)

De acuerdo con los resultados obtenidos, podemos observar que para el tramo 1 (Figura II. III), a la entrada del refrigerante existe una caída de temperatura aproximadamente de 0,5 °C. y posterior a ello, los termopares mantienen una tendencia descendente según las diferentes ubicaciones. Lo mismo sucede para el tramo 2 y 3 (T6 – T15), en los cuales no existe una caída de temperatura superior a 0,5 °C. Dado esto, se puede asumir que efectivamente la temperatura se mantiene constante en el condensador, al pasar el refrigerante de gas saturado a líquido saturado manteniendo una presión constante. Sin embargo, en el último tramo (Figura II. VI), se aprecia claramente que se produce un subenfriamiento de 1.5 °C aproximadamente en el refrigerante. Por ende, es factible concluir que un punto adecuado para registrar la temperatura en el condensador es en la mitad del componente. No se recomienda ubicar a la entrada del condensador porque el refrigerante todavía se encuentra sobrecalentado (T1 – T2) y tampoco a la salida debido a que el refrigerante ya se encuentra subenfriado (T18 – T20).

ANEXO III

Pruebas en el evaporador

Para realizar las pruebas en el evaporador, se utilizó los módulos MAX31855, los cuales son capaces de medir temperaturas menores a 0 °C. Estos módulos tienen una configuración diferente a los MAX6675 y es que ambos módulos no se pueden conectar a la vez en la misma línea de tubería con el termopar abierto. Al conectar los termopares de formar abierta, estos se cortocircuitan y no transmiten señal.

Para solucionar este problema, se decidió juntar los termopares para realizar una medición puntual, y se los cubrió con cinta termo fundible con la finalidad de que la cinta actúe como aislante eléctrico y estos no hagan contacto directo con la superficie metálica. Al realizar esto se produce un error en los valores obtenidos debido a que no se registra la temperatura superficial de la tubería. Para solucionar estos dos problemas se realizó una prueba para ajustar los valores del termopar. Para ello se procedió a ubicar solo un termopar abierto en la línea de tubería y el otro cerca de este, con la diferencia que este estaba unido y recubierto con cinta termo fundible.

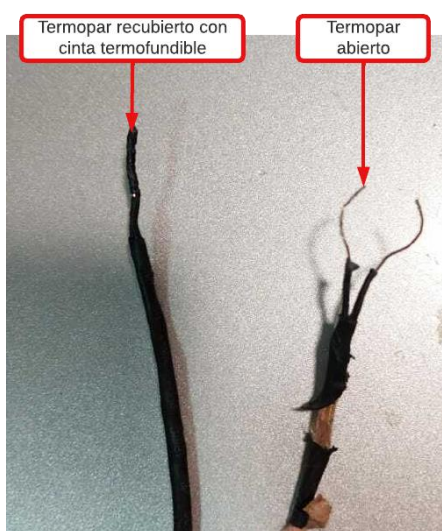


Figura III. I Termopar recubierto con cinta termofundible y termopar abierto

(Fuente: Propia)

Los resultados se muestran en la Figura III. II.

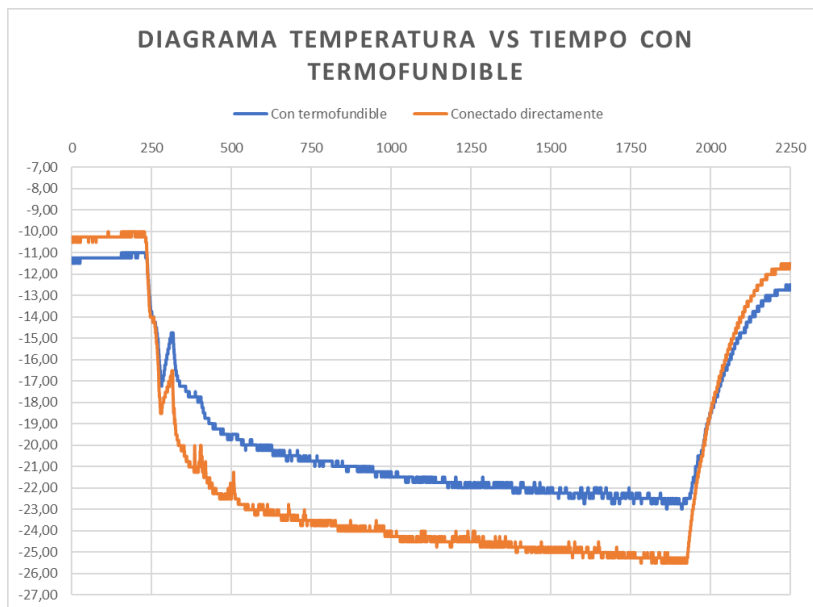


Figura III. II Diagrama temperatura vs tiempo para termopar conectado directamente y con cinta termo fundible
(Fuente: Propia)

Mediante la ayuda de curvas de ajuste en la hoja de cálculo de Excel, se procedió a obtener la pendiente para ajustar los valores a los valores del termopar conectado directamente.

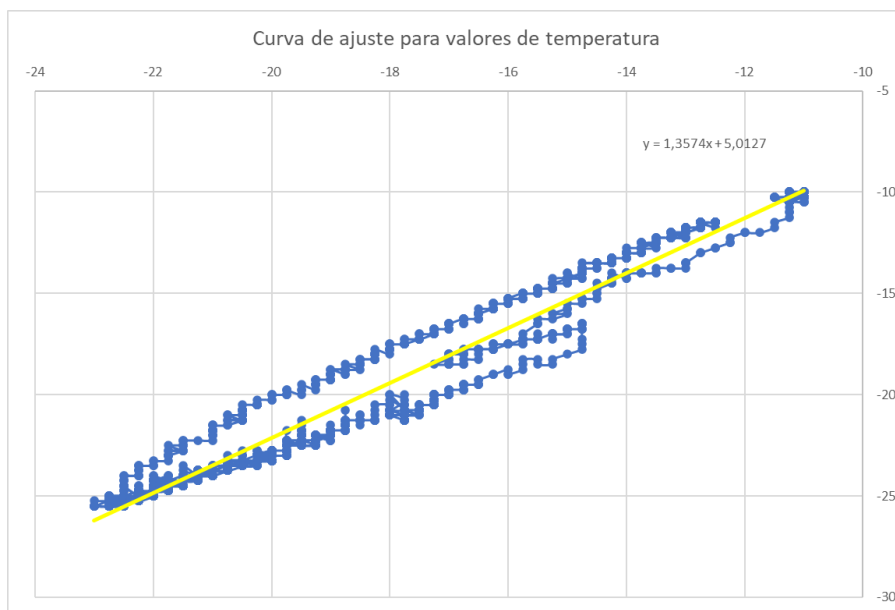


Figura III. III Curva de ajuste para valores de temperatura
(Fuente: Propia)

Al tener la ecuación de la línea de tendencia, se programaron los valores obtenidos en el termopar con aislamiento y se obtuvo el siguiente comportamiento mostrado en la Figura III. IV.

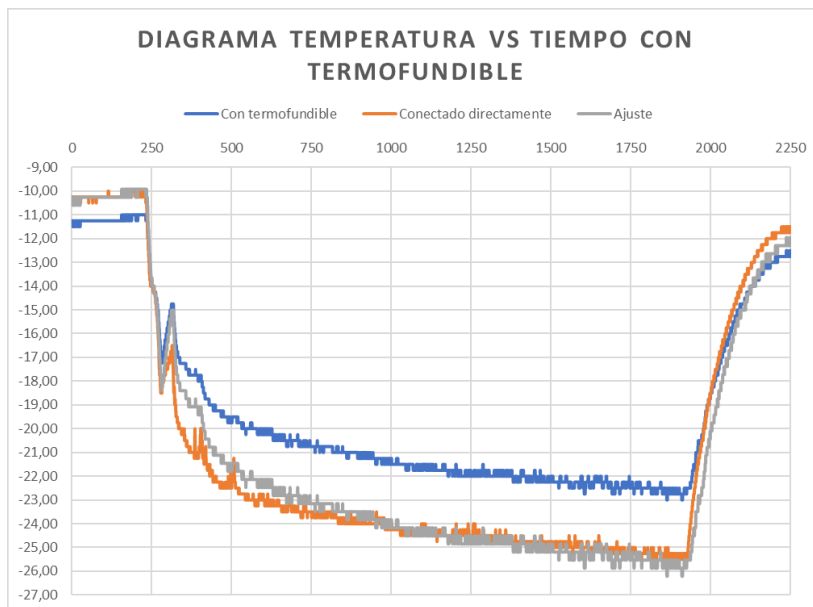


Figura III. IV Diagrama con curva de ajuste para valores de temperatura
(Fuente: Propia)

Según la Figura III. IV con la curva de ajuste, los resultados se aproximan notablemente al termopar conectado directamente. Este ajuste se realiza para cada termopar utilizado con el módulo MAX31855 y se procede a realizar las pruebas en el evaporador.

Para las pruebas en el evaporador, se procedió a ubicar en diferentes posiciones todos los termopares disponibles dentro del evaporador y se cerró la puerta del compartimiento del congelador.

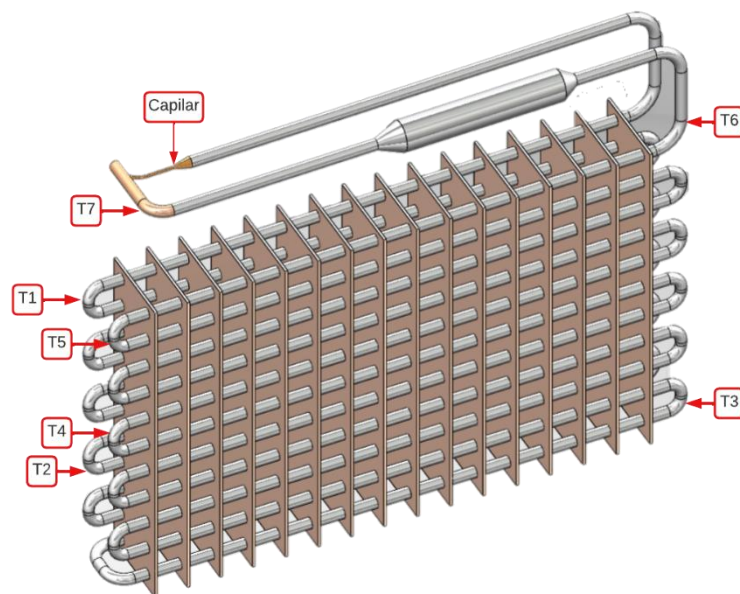


Figura III. V Esquema de ubicación de termopares en el evaporador
(Fuente: Propia)

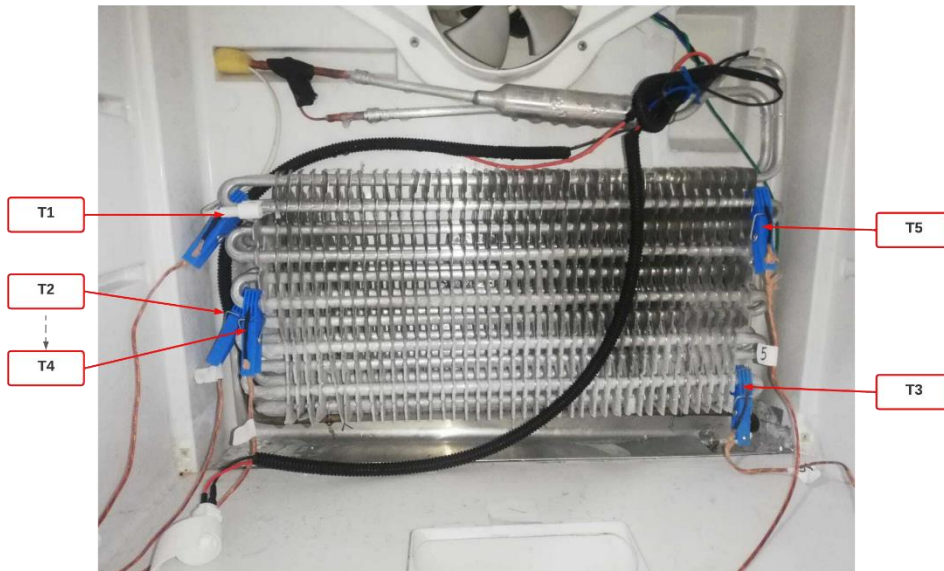


Figura III. VI Ubicación de termopares en el evaporador
(Fuente: Propia)

Después de la hora y media, se procedió a medir la temperatura en cada termopar, y se obtuvieron los siguientes resultados.

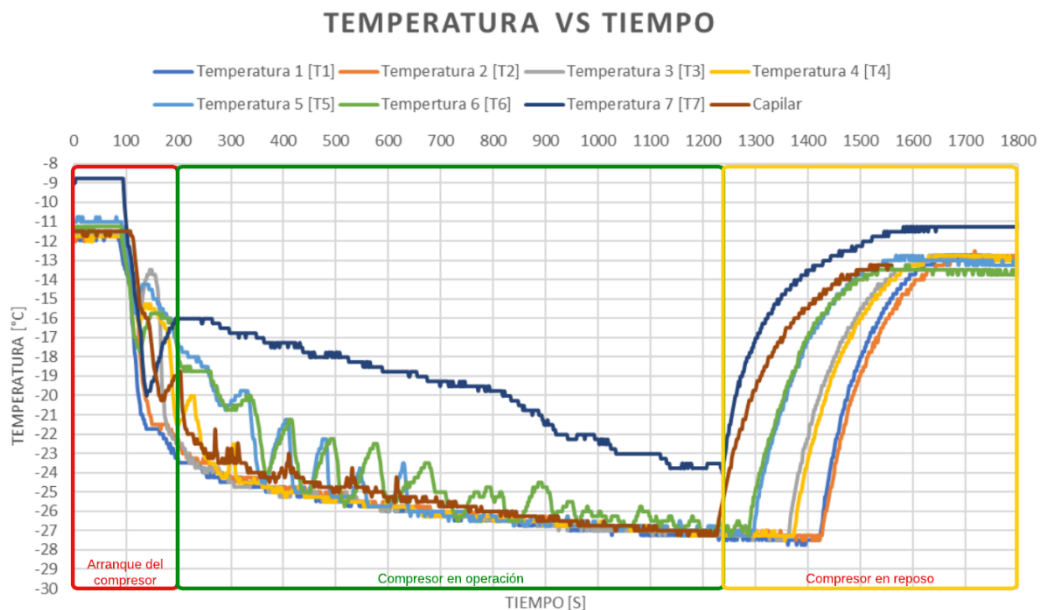


Figura III. VII Diagrama temperatura vs tiempo para termopares en el evaporador.
(Fuente: Propia)

En los datos obtenidos en la Figura III. VII, existe un desfase en el tiempo que el compresor entra en reposo. Esto se da debido a que los resultados se tomaron en diferentes periodos de tiempo. Sin embargo, se puede observar que los termopares que se encuentran en el serpentín de bajada del evaporador tienen una estabilidad en todo su proceso. Por otra parte, los que se encuentran en el serpentín de subida del evaporador, tienen un comportamiento fluctuante y se debe a que en esta parte el refrigerante empieza a obtener una mayor calidad, acercándose más al estado de gas saturado.

ANEXO IV

Código de programación en Arduino

```
#include <SPI.h>
#include "max6675.h"
#include <Adafruit_MAX31855.h>

//termocupla 1
int thermo1DO = 11;
int thermo1CS = 12;
int thermo1CLK = 13;

MAX6675 thermocuple1(thermo1CLK, thermo1CS, thermo1DO);

//termocupla 2
int thermo2DO = 7;
int thermo2CS = 8;
int thermo2CLK = 9;

MAX6675 thermocuple2(thermo2CLK, thermo2CS, thermo2DO);

//termocupla 3
int thermo3DO = 3;
int thermo3CS = 4;
int thermo3CLK = 5;

MAX6675 thermocuple3(thermo3CLK, thermo3CS, thermo3DO);

//termocupla 4
int thermo4DO = 18;
int thermo4CS = 17;
int thermo4CLK = 16;

MAX6675 thermocuple4(thermo4CLK, thermo4CS, thermo4DO);

//termocupla 5

int thermo5CS = 44;
int thermo5DO = 50;
int thermo5CLK = 52;

Adafruit_MAX31855 thermocuple5(thermo5CLK, thermo5CS, thermo5DO);

//termocupla 6

int thermo6CS = 45;
//int thermo6DO= 48;
//int thermo6CLK= 52;

Adafruit_MAX31855 thermocuple6(thermo5CLK, thermo6CS, thermo5DO);

void setup() {
  //
  Serial.begin(9600);
}
```

```

void loop() {
  //
  float temp1;
  float temp2;
  float temp3;
  float temp4;
  float temp5;
  float temp6;

  temp1 = thermocuple1.readCelsius();
  temp2 = thermocuple2.readCelsius();
  temp3 = thermocuple3.readCelsius();
  temp4 = thermocuple4.readCelsius();
  temp5 = thermocuple5.readCelsius();
  temp6 = thermocuple6.readCelsius();

  Serial.print(temp1+(-0.0018*temp1+2.9095), 2); // calibración manual termopar 1
  Serial.print(",");
  Serial.print(temp2+(-0.0056*temp2+5.012)+5, 2); // calibración manual termopar 2
  Serial.print(",");
  Serial.print(temp3+(0.0032*temp3+2.3839)+5, 2); // calibración manual termopar 3
  Serial.print(",");
  Serial.print(temp4+(-0.0055*temp4+3.3255), 2); // calibración manual termopar 4
  Serial.print(",");
  Serial.print(temp5+(0.0018*temp5+0.894), 2); // calibración manual termopar 5
  Serial.print(",");
  Serial.println(temp6+(-0.0013*temp6+0.715), 2); // calibración manual termopar 6

  delay(411);
}

```


ANEXO V

Programación de la Interfaz gráfica

En la sección presente, se detalla los comandos principales programados en Python para poder obtener la interfaz final del programa.

Conexión serial

La conexión serial tiene la funcionalidad de seleccionar el puerto COM de entrada disponible, y la velocidad de señal. Sin la configuración de este apartado, el programa no funciona.

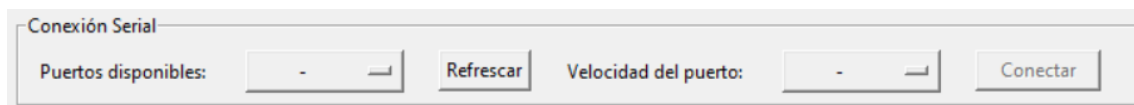


Figura V. I Enmarcado para seleccionar las condiciones de conexión serial
(Fuente: Propia)

El botón *Refrescar* de la Figura V. I está configurado para setear los valores a condiciones iniciales (Símbolo “ - “). Al estar con condiciones iniciales, el programa por defecto deshabilita el estado del botón *Conectar*, y este se activa siempre y cuando se tenga un puerto disponible seleccionado y la velocidad de señal configurada.

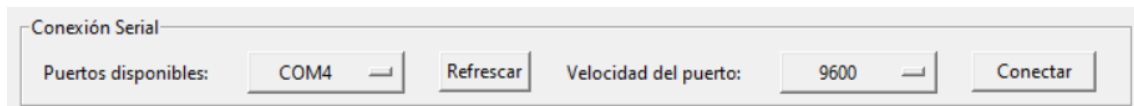


Figura V. II Selección de puerto COM habilitado y velocidad de señal disponible para comenzar la evaluación.
(Fuente: Propia)

Selección del refrigerante, sistema de unidades y del tipo de diagrama

Se agrupan los tres enmarcados, considerando que la programación de cada uno de estos es similar, puesto que, todos utilizan el comando *ComboBox*, y una lista de tópicos para cada caso.



Figura V. III Enmarcado para la selección del refrigerante
(Fuente: Propia)

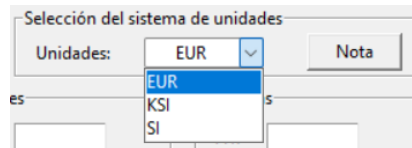


Figura V. IV Enmarcado para seleccionar el sistema de unidades
(Fuente: Propia)

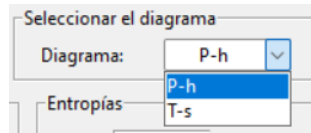


Figura V. V Enmarcado para seleccionar el tipo de diagrama
(Fuente: Propia)

La Nota que se encuentra dentro del enmarcado para seleccionar el sistema de unidades (Figura V. IV), presenta al usuario en que unidades se configura la selección de cada tópico.

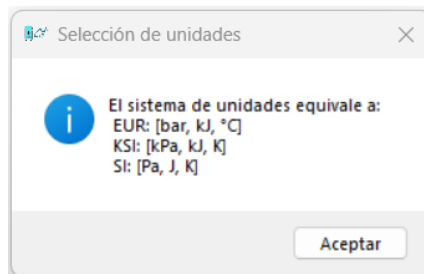


Figura V. VI Nota para la selección de unidades
(Fuente: Propia)

Temperaturas, presiones, entalpías y entropías

Cada propiedad del refrigerante se ha programado para presentar resultados en tiempo real en la interfaz gráfica. Cada uno de los resultados es ingresado en una caja de texto (Entry) para cada propiedad y estos se actualizan cada tres segundos. Los valores se cambian automáticamente al seleccionar otro refrigerante o al seleccionar otro sistema de unidades.

Temperaturas	Presiones	Entalpías	Entropías
T1: 47.0 [°C]	P1: 0.777 [bar]	H1: 636.772 [kJ/kg]	S1: 2.673 [kJ/kg.°C]
T2: 69.75 [°C]	P2: 4.66 [bar]	H2: 667.556 [kJ/kg]	S2: 2.52 [kJ/kg.°C]
T2s: 35.25 [°C]	P2s: 4.66 [bar]	H2s: 596.346 [kJ/kg]	S2s: 2.3 [kJ/kg.°C]
T3: 35.25 [°C]	P3: 4.66 [bar]	H3: 283.922 [kJ/kg]	S3: 1.287 [kJ/kg.°C]
T4: 29.25 [°C]	P4: 4.66 [bar]	H4: 269.058 [kJ/kg]	S4: 1.238 [kJ/kg.°C]
T5: -17.5 [°C]	P5: 0.799 [bar]	H5: 269.058 [kJ/kg]	S5: 1.276 [kJ/kg.°C]
T5h: -18.18 [°C]	P5h: 0.777 [bar]	H5h: 283.922 [kJ/kg]	S5h: 1.335 [kJ/kg.°C]
T6: -17.18 [°C]	P6: 0.777 [bar]	H6: 531.335 [kJ/kg]	S6: 2.306 [kJ/kg.°C]

Figura V. VII Resultados para diferentes propiedades del refrigerante.
(Fuente: Propia)

Las propiedades calculadas y presentadas en la Figura V. VII, incluyen los resultados para un ciclo ideal y real. Las propiedades que con acompañado una letra “s”, es que el proceso es realizado a entropía constante, y para las propiedades que son acompañadas de la letra “h”, quiere decir que el proceso se realiza a entalpía constante.

Subenfriamiento, recalentamiento y pérdida de energía en el intercambiador.

Se había comentado que, estos arreglos permiten ajustar los resultados a un proceso real reduciendo el error de estos. Cada uno de estos arreglos están programados mediante el comando *Scale*, según un rango de valores establecido, y al deslizarlos se actualiza automáticamente. La temperatura de subenfriamiento afecta al estado 4 (T4) y la temperatura de recalentamiento al estado 6 (T6). Por otra parte, la pérdida de energía afecta a la entalpía en el estado 5 (H5).

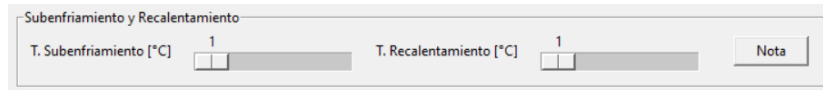


Figura V. VIII Arreglos de temperatura de subenfriamiento y recalentamiento en la interfaz gráfica
(Fuente: Propia)

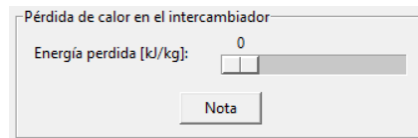


Figura V. IX Arreglo de pérdida de energía en la interfaz gráfica
(Fuente: Propia)

Cada arreglo del sistema tiene apoyo en un *Nota*, la cual ayuda al usuario a definir valores referenciales para cada caso.

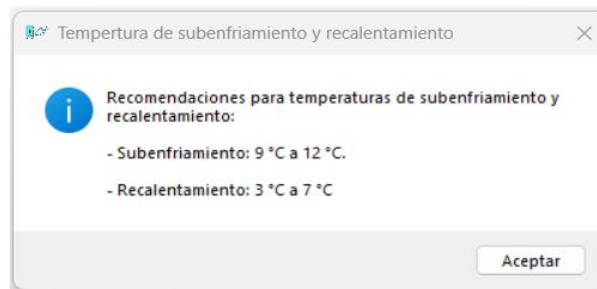


Figura V. X Nota para temperaturas de subenfriamiento y recalentamiento referenciales
(Fuente: Propia)

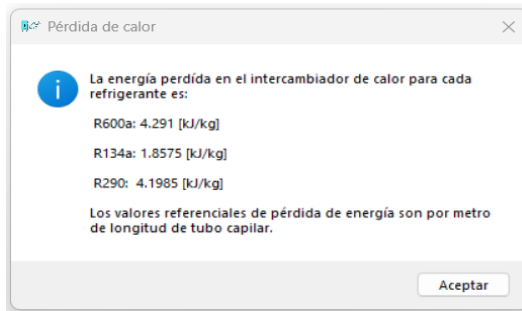


Figura V. XI Nota para pérdida de calor en el intercambiador de calor
(Fuente: Propia)

Resultados ideales y resultados reales

En este enmarcado, la programación para presentar los resultados es semejante para cada caso, ideal y real. Los resultados a mostrarse son:

- q_{in} : Calor de entrada
- q_{out} : Calor de salida
- w_{in} : Trabajo de entrada
- COP : Coeficiente de desempeño

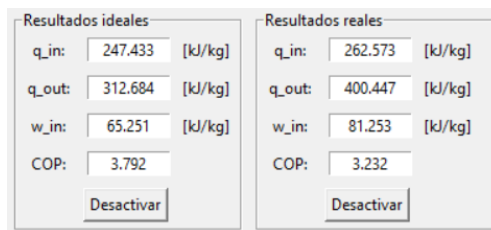


Figura V. XII Enmarcado de resultado ideales y reales en la Interfaz gráfica
(Fuente: Propia)

Los resultados pueden ocultarse si no se requieren analizar, al seleccionar el botón *Desactivar*.

Tipo de sistema y diagrama de componentes

A pesar de que los enmarcados son diferentes para el tipo de sistema y el diagrama de componentes, este último depende del checkbox configurado en el tipo del sistema. La Figura V. XIII muestra el contenido de este apartado.

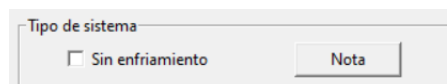


Figura V. XIII Enmarcado del tipo de sistema en la interfaz gráfica
(Fuente: Propia)

Este enmarcado es acompañado de una *Nota*, la cual contiene información del funcionamiento del *checkbox* "Sin enfriamiento" al estar activado o desactivado. La información dentro de la *Nota* se muestra a continuación.

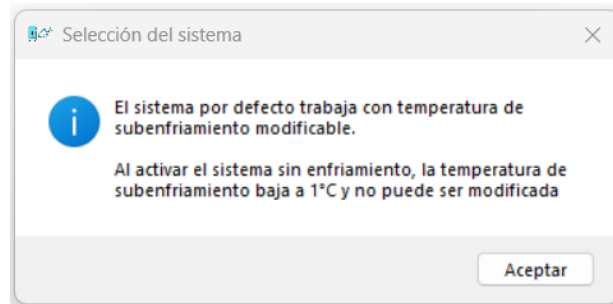


Figura V. XIV Nota para la selección del tipo de sistema
(Fuente: Propia)

Como dice la Figura V. XIV, el sistema por defecto trabaja con enfriamiento, esto es, cuando existe un intercambiador de calor mediante arreglos con el tubo capilar. Una representación de sistema de componentes con enfriamiento se muestra en la Figura V. XV.

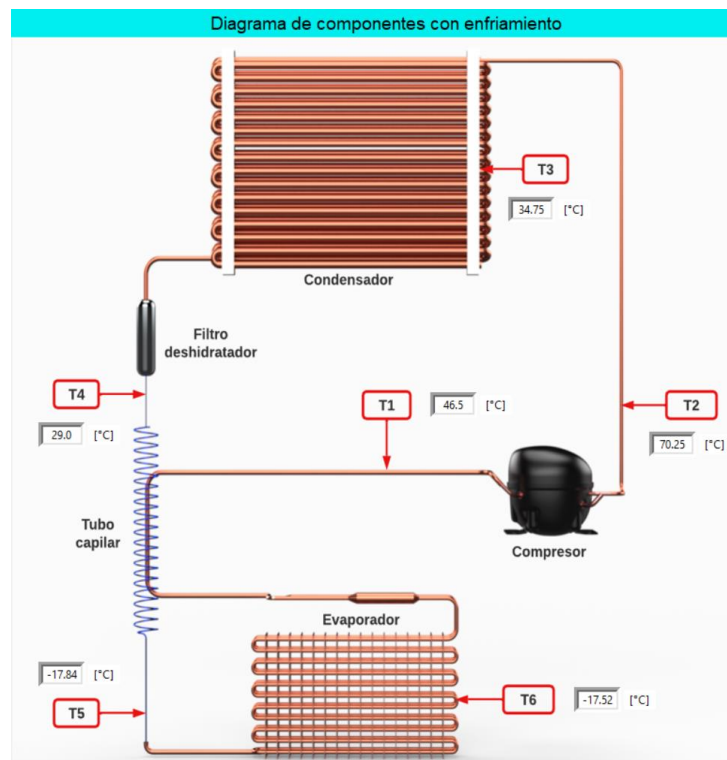


Figura V. XV Diagrama de componentes con enfriamiento
(Fuente: Propia)

En el caso de que el checkbox “Sin enfriamiento” este activado (Figura V. XVI), el diagrama de componentes cambia su configuración y por cuestiones de programación, el programa setea la temperatura a 1 °C.

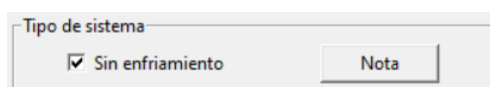


Figura V. XVI Checkbox “Sin enfriamiento” del tipo de sistema activado
(Fuente: Propia)

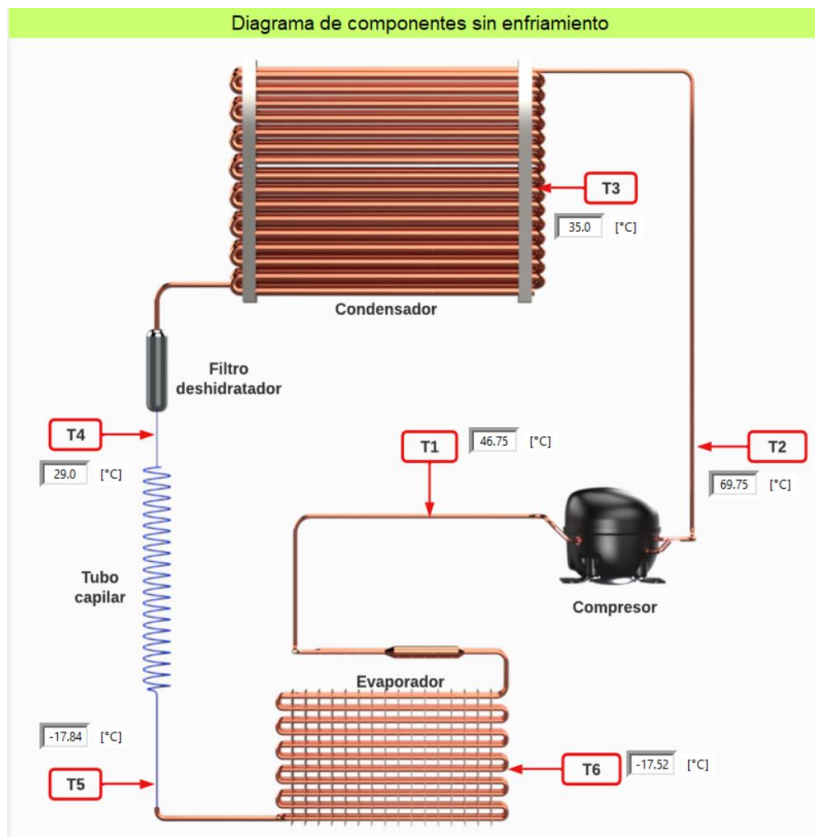


Figura V. XVII Diagrama de componentes sin enfriamiento
(Fuente: Propia)

Al no tener enfriamiento el sistema (Figura V. XVII), esto quiere decir que no existen arreglos de intercambio de calor en el tubo capilar. Por esta razón, es que los enmarcados del tipo de sistema y diagrama de componentes son dependientes entre ellos.

Instrucciones de uso

La ventana de instrucciones de la interfaz gráfica está dividida en 3 secciones:

- Introducción.- Esta sección presenta el nombre asociado del programa y explica brevemente la funcionalidad de este.
- Instrucciones.- En esta sección se detalla paso a paso como identificar cada termopar, donde ubicar cada uno de estos y como configurar el programa para iniciar con el proceso de evaluación
- Observaciones y recomendaciones.- Esta sección hace recomendaciones para tener procesos óptimos de resultados y además de dar a conocer las desventajas del programa.

La ventana asociada a las instrucciones de uso se presenta en la Figura V. XVIII.

Instrucciones de Uso

Introducción
 Bienvenido a Cooling Cycle Tester (CCT)
 El CCT es un programa que calcula propiedades termodinámicas de refrigerantes utilizados en ciclos de refrigeración, a partir de la medición de valores de temperatura en tiempo real. Estos resultados pueden visualizarse mediante diagramas P-h o T-s, además de contar con un apartado para observar un diagrama de componentes asociado a dos situaciones:

- Diagrama de componentes con enfriamiento.
- Diagrama de componentes sin enfriamiento.

El programa por defecto trabaja con enfriamiento. El mismo puede deshabilitarse al seleccionar la casilla "Sin enfriamiento". La diferencia entre ambos eventos es que, al estar habilitado el sistema sin enfriamiento, el programa automáticamente define una temperatura de 1°C en el lado de Subenfriamiento y no puede ser modificable hasta que se desactive.

Instrucciones
 Para iniciar con la evaluación del ciclo siga las siguientes instrucciones:

1. Identifique los termopares enumerados del 1 al 6, como se esquematiza en la figura adjunta. Para esto, usted encontrará su identificación en las pinzas de los termopares o a su vez, en el instrumento principal de conexión.
2. Conecte el termopar 1 (T1) a una distancia de 8 a 9 cm alejado del compresor en la línea de absorción o tubería de entrada.
3. Conecte el termopar 2 (T2) a una distancia de 8 a 9 cm alejado del compresor en la línea de descarga o tubería de salida.
4. Conecte el termopar 3 (T3) en la zona central del condensador. No conecte en tuberías superiores o inferiores del componente.
5. Conecte el termopar 4 (T4) en la parte inicial del dispositivo de expansión.
6. Conecte el termopar 5 (T5) a la salida del dispositivo de expansión.
7. Conecte el termopar 6 (T6) en la zona central del evaporador. No conecte a la salida del componente.
8. Abra el programa CCT y seleccione el puerto COM disponible del instrumento con la velocidad en baudios establecida. En el caso de no tener disponible el puerto COM, desconecte y vuelva a conectar y presione el botón "Refrescar".
9. Presione el botón "Conectar" y podrá observar los resultados de su sistema.

Observaciones y recomendaciones

- El programa puede demorar en procesar las imágenes de los diagramas entre cinco y seis segundos. Esto depende de la capacidad de la computadora en la que se ejecute el programa CCT.
- Al cambiar el tipo de fluido, se recomienda cerrar la ventana de los diagramas y nuevamente abrirlas.
- La diferencia entre los ciclos de refrigeración con enfriamiento es el arreglo del tubo capilar en la tubería de absorción, el cual funciona como un intercambiador de calor, con la finalidad de mejorar el COP de los sistemas de refrigeración

[Regresar](#)

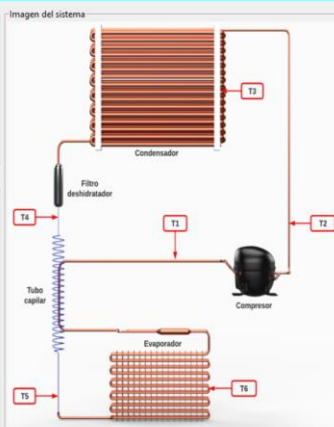


Figura V. XVIII Ventana de instrucciones de uso del programa Cooling Cycle Tester
 (Fuente: Propia)

Procesamiento de imágenes

En el enmarcado para procesar imágenes, hay tres posibilidades de observar los resultados, ciclo ideal, ciclo real, ciclo ideal y real.

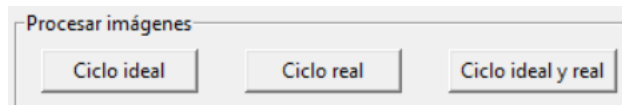
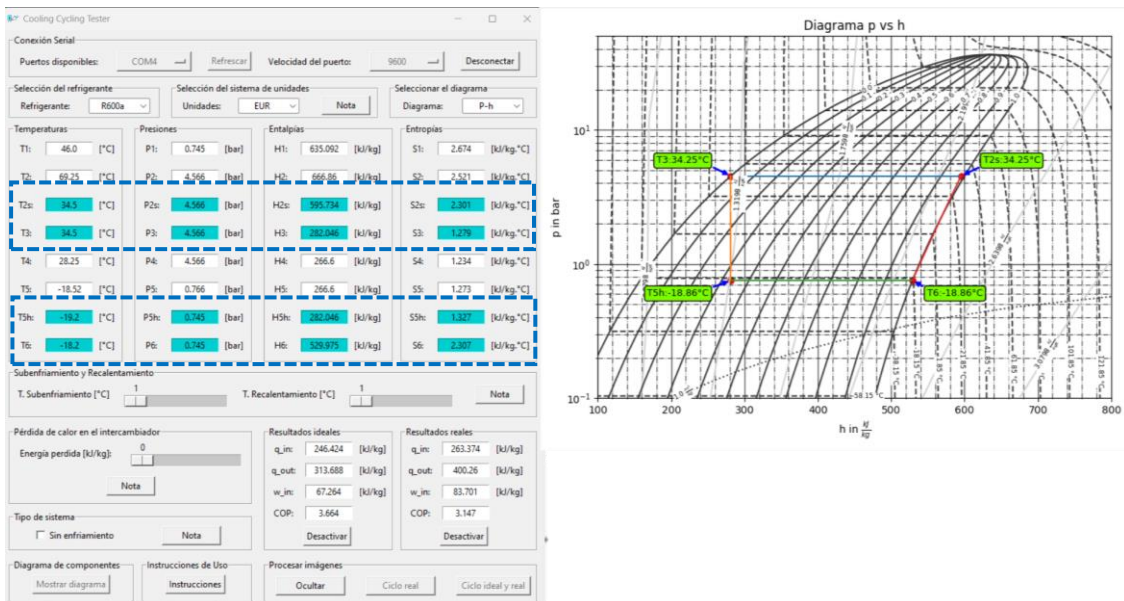


Figura V. XIX Enmarcado para el procesamiento de imágenes
 (Fuente: Propia)



Conexión Serial
 Puertos disponibles: COM4 Refrescar Velocidad del puerto: 9600 Desconectar

Selección del refrigerante
 Refrigerante: R600a Unidades: EUR Diagrama: P-h

Temperaturas	Presiones	Entalpías	Entropías
T1: 46.0 [°C]	P1: 0.745 [bar]	H1: 635.092 [kJ/kg]	S1: 2.674 [kJ/kg·°C]
T2: 69.35 [°C]	P2: 4.566 [bar]	H2: 666.86 [kJ/kg]	S2: 2.521 [kJ/kg·°C]
T3: 34.3 [°C]	P3: 4.566 [bar]	H3: 282.046 [kJ/kg]	S3: 1.279 [kJ/kg·°C]
T4: 28.25 [°C]	P4: 4.566 [bar]	H4: 266.6 [kJ/kg]	S4: 1.234 [kJ/kg·°C]
T5: -18.52 [°C]	P5: 0.766 [bar]	H5: 266.6 [kJ/kg]	S5: 1.273 [kJ/kg·°C]
T6: -18.2 [°C]	P6: 0.745 [bar]	H6: 282.046 [kJ/kg]	S6: 1.327 [kJ/kg·°C]

Subenfriamiento y Recalentamiento
 T. Subenfriamiento [°C]: 1 T. Recalentamiento [°C]: 1

Pérdida de calor en el intercambiador
 Energía perdida [kJ/kg]: 0

Resultados ideales		Resultados reales	
q _{in} :	246.424 [kJ/kg]	q _{in} :	263.374 [kJ/kg]
q _{out} :	313.688 [kJ/kg]	q _{out} :	400.26 [kJ/kg]
w _{in} :	67.264 [kJ/kg]	w _{in} :	83.701 [kJ/kg]
COP:	3.664	COP:	3.147

Diagrama p vs h
 Diagrama de presión (p) vs entalpía (h) para un ciclo de refrigeración. Se muestran las curvas de saturación y las líneas de estado del refrigerante. Los puntos de operación están etiquetados con sus temperaturas: T3 = 34.25°C, T2 = 34.25°C, T5 = -18.86°C, T6 = -18.86°C.

Figura V. XX Procesamiento de imágenes para un ciclo ideal de refrigeración
 (Fuente: Propia)

Como se explicó en la sección de programación para el procesamiento de imágenes con fluprodia, se ha realizado la programación para cada caso mencionado. En el caso de tener activado el ciclo ideal, los botones correspondientes a los otros ciclos, se deshabilitan y en la interfaz gráfica se resaltan los estados involucrados del sistema (Figura V. XX). La misma metodología es aplicada para el caso del ciclo real (Figura V. XXI).

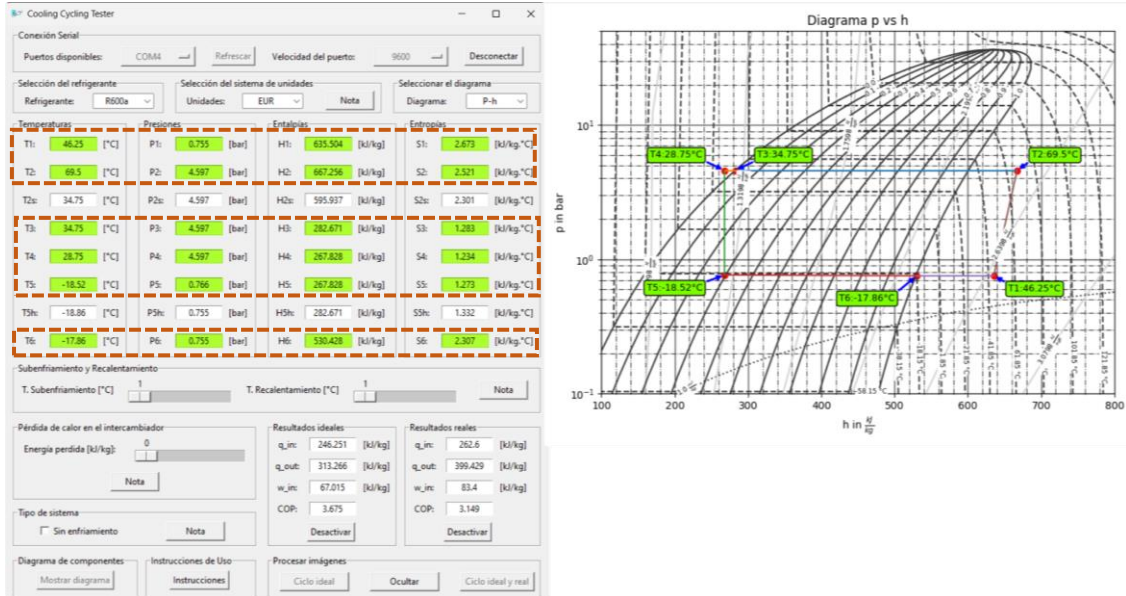


Figura V. XXI Procesamiento de imágenes para un ciclo real de refrigeración (Fuente: Propia)

Para el caso del procesamiento de imágenes con el ciclo ideal y real, no se resaltan los estados, considerando que, en este caso, todos los estados están involucrados.

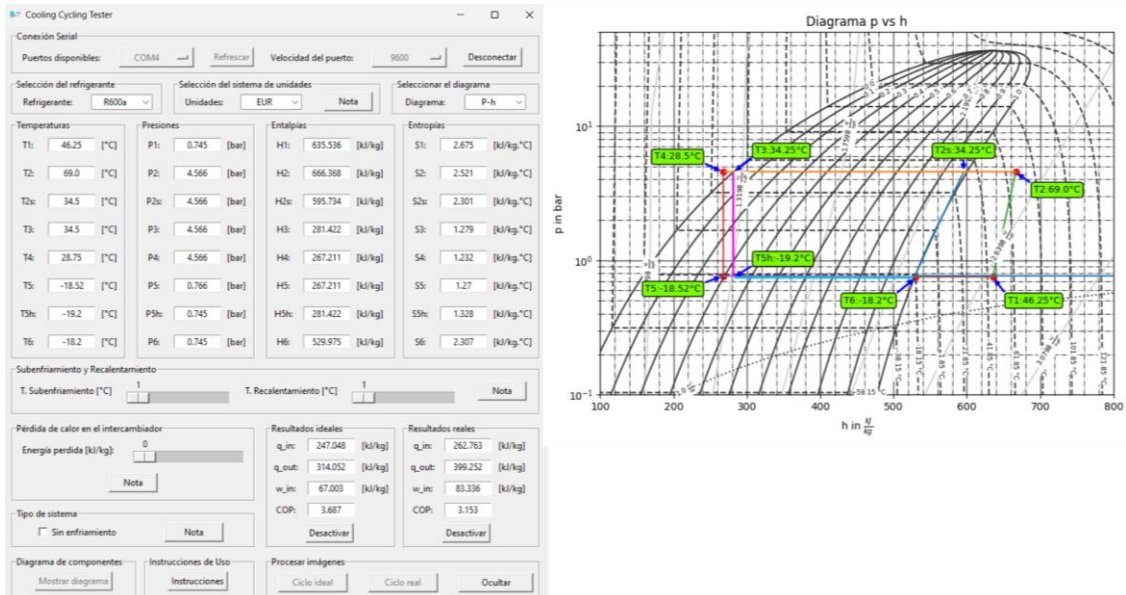
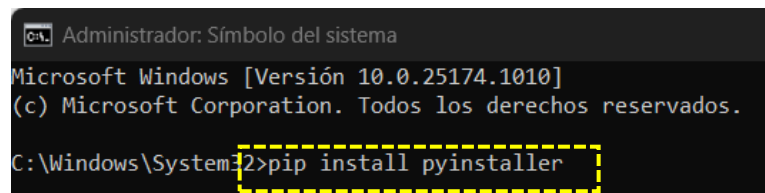


Figura V. XXII Procesamiento de imágenes para comparativa entre el ciclo ideal y real de refrigeración (Fuente: Propia)

Se ha explicado detalladamente el uso de la interfaz gráfica, las funcionalidades de cada enmarcado y los resultados que se pueden obtener de esta. Además, se le ha definido al programa como Cooling Cycle Tester (CCT). Este nombre se lo da, considerando la funcionalidad del programa y la ayuda que brinda. Se hace notar que el programa tiene la desventaja en el procesamiento de imágenes, pues esta tiene un retardo de cuatro a cinco segundos con respecto a los resultados mostrados en la interfaz. Otra desventaja es que se debe cerrar la ventana del procesamiento de imágenes para cambiar el análisis a otro refrigerante. Sin embargo, al no estar realizando el procesamiento de imágenes, el programa trabaja con fluidez y al mostrar el diagrama de componentes no se ralentiza, puesto que el diagrama es una imagen estática y solo se actualizan los valores de temperatura.

Programación para obtener el archivo ejecutable

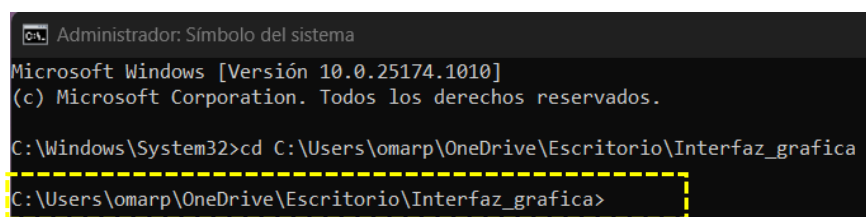
Para obtener el archivo ejecutable se utiliza la librería Pyinstaller. Toda la programación se realiza desde el *command window* de Windows iniciando con la instalación de la librería (Figura V. XXIII).



```
Administrador: Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.25174.1010]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.
C:\Windows\System32>pip install pyinstaller
```

Figura V. XXIII Ejemplo de programación en el CMD para descargar e instalar Pyinstaller
(Fuente: Propia)

Posterior a instalar la librería, hay que dirigirse al directorio donde se encuentra el archivo .py de la interfaz gráfica (Figura V. XXIV).



```
Administrador: Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.25174.1010]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.
C:\Windows\System32>cd C:\Users\omarp\OneDrive\Escritorio\Interfaz_grafica
C:\Users\omarp\OneDrive\Escritorio\Interfaz_grafica>
```

Figura V. XXIV Programación para dirigirse al directorio de la interfaz gráfica
(Fuente: Propia)

Hay tres maneras en las que se puede crear el archivo ejecutable:

- Creación automática sin icono de identificación y dependiente de Python
- Creación automática con icono de identificación y dependiente de Python
- Creación automática con icono de identificación e independiente de Python

De los tres casos, el apartado final crea un archivo independiente de Python, factible para ser ejecutado en cualquier ordenador, aunque este no tenga el programa Python. Por

consiguiente, debido a que el ejecutable es de autoría propia, se ha creado un logo para diferenciar el programa (Figura V. XXV).



Figura V. XXV Logo de Cooling Cycle Tester
(Fuente: Propia)

Para que este logo sea configure en el ejecutable, la imagen debe tener la extensión .ico, que es fácilmente transformarla en cualquier página de internet que permita cambiar extensiones.

Finalmente, la programación para obtener el ejecutable se muestra en la Figura V. XXVI.

```
Administrador: Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.25174.1010]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Windows\System32>cd C:\Users\omarp\OneDrive\Escritorio\Interfaz_grafica
C:\Users\omarp\OneDrive\Escritorio\Interfaz_grafica>pyinstaller --windowed --onefile --icon=./logo_tesis.ico Interface_tkinter.py
```

Figura V. XXVI Programación para la obtención del archivo ejecutable
(Fuente: Propia)

Al finalizar la ejecución del código, se genera un archivo .exe en la carpeta “dist”. A esta carpeta se le adjunta las imágenes del diagrama de componentes debido a que estas se crearon externamente y son parte del programa.



Figura V. XXVII Contenido de la carpeta “dist” para ejecutar el programa en cualquier ordenador
(Fuente: Propia)

ANEXO VI

Creación de placa PCB

Para la creación de la placa PCB se ha desarrollado la metodología mostrada en la Figura VI. I.

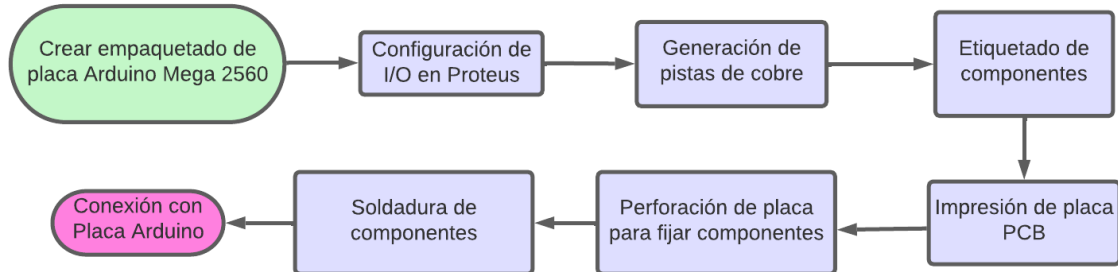


Figura VI. I Metodología para desarrollo de la Placa PCB

(Fuente: Propia)

Crear empaquetado de placa Arduino Mega 2560

Proteus no dispone de todos los componentes electrónicos que existen en la actualidad, por ende, se llama empaquetado cuando se crea un componente que no es convertible del esquema electrónico al diseño en placa PCB. Al crear el empaquetado, el componente es apto para configurarse con el esquema electrónico según las entradas/salidas (I/O) programadas en el IDE de Arduino. Con esta programación, las pistas de cobre se generan automáticamente según como se distribuyan los componentes. La distribución de componentes se varía hasta que el programa encuentre la menor cantidad de conflictos. Los conflictos se relacionan con las conexiones no realizadas y estas se solucionan manualmente soldando un cable como puente para unir las pistas a la I/O necesaria.

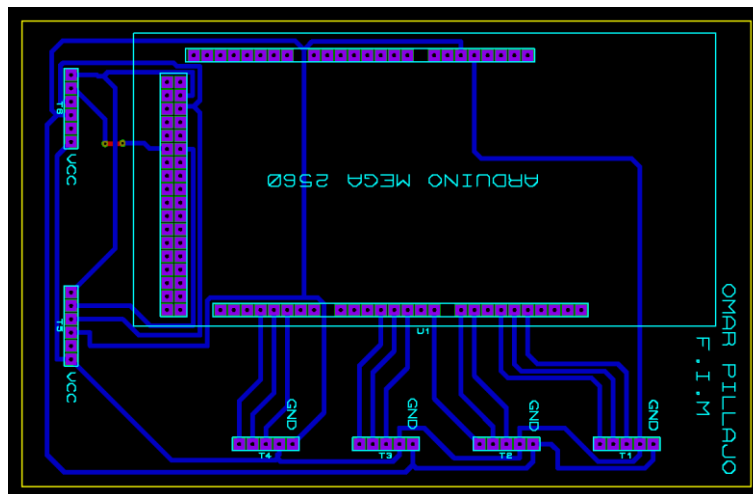


Figura VI. II Empaquetado y esquema de pistas de placa Arduino Mega 2560

(Fuente: Propia)

En la Figura VI. II se observa también el etiquetado de cada módulo. La nomenclatura para cada módulo de temperatura corresponde según el estado en el que se encuentra y la propiedad que se mide (Sensor de temperatura estado 1 "T1"). Se puede añadir otra información a la placa como nombre del desarrollador, título de los pines referenciales de la primera entrada, etc.



Figura VI. III Etiquetado de información en placa PCB
(Fuente: Propia)

Al imprimirse la placa se procede a perforar la placa según la posición de cada módulo para posteriormente ser soldadas.

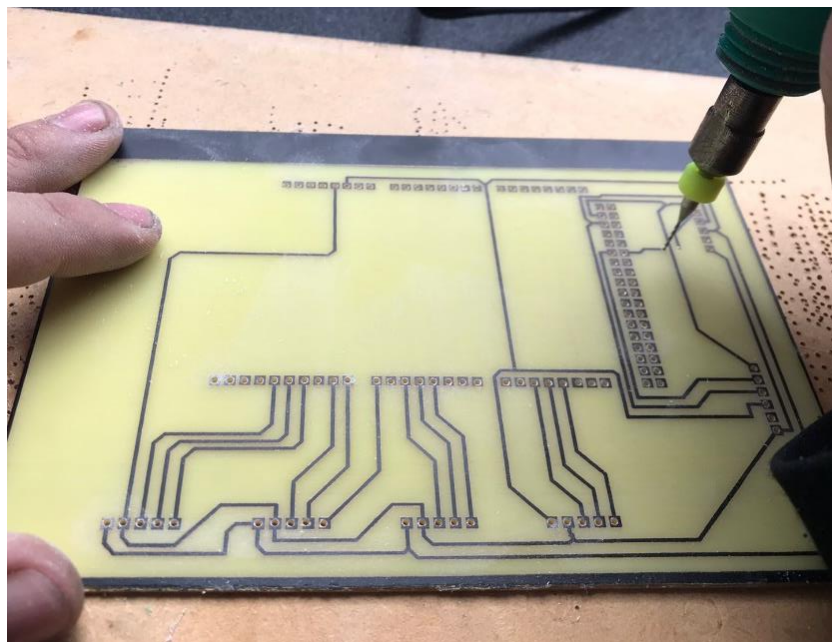


Figura VI. IV Perforación de placa PCB para soldadura de componentes
(Fuente: Propia)

Con los agujeros realizados, se procede a ubicar cada módulo en las diferentes pistas de la placa para posteriormente ser soldadas.

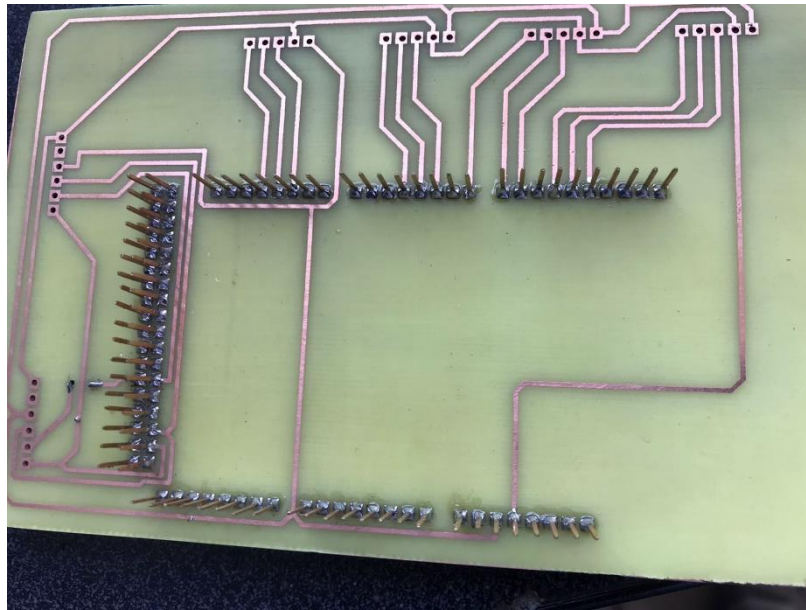


Figura VI. V Unión mediante soldadura de componentes
(Fuente: Propia)

Finalmente, se energiza el prototipo electrónico para confirmar que no exista errores en la impresión y que todos los componentes estén funcionando correctamente.

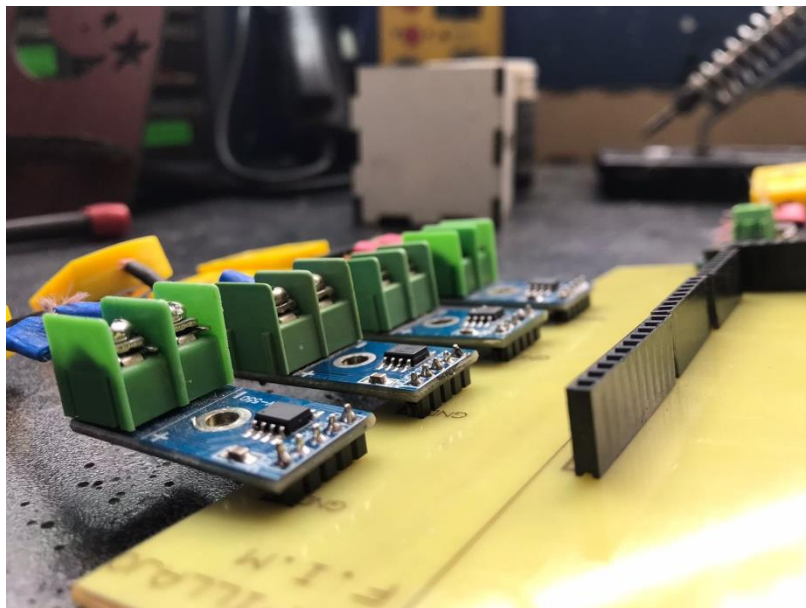
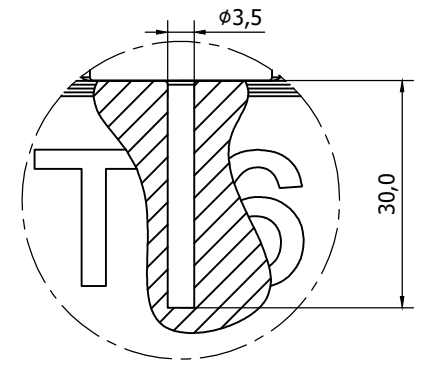
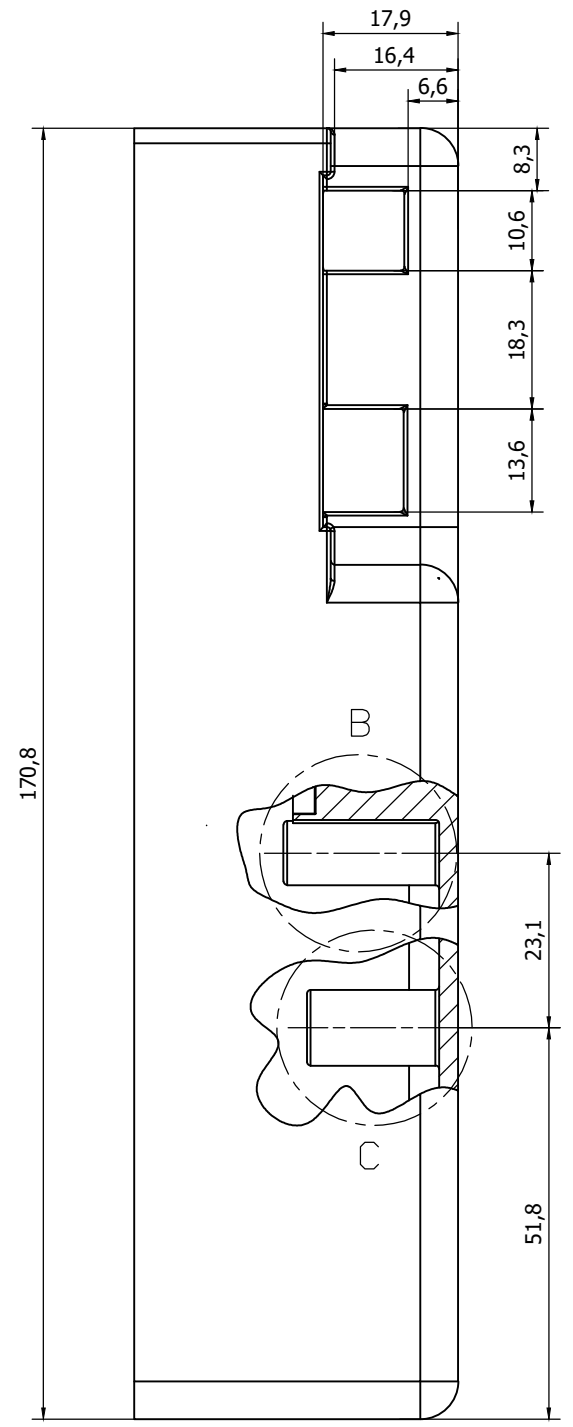
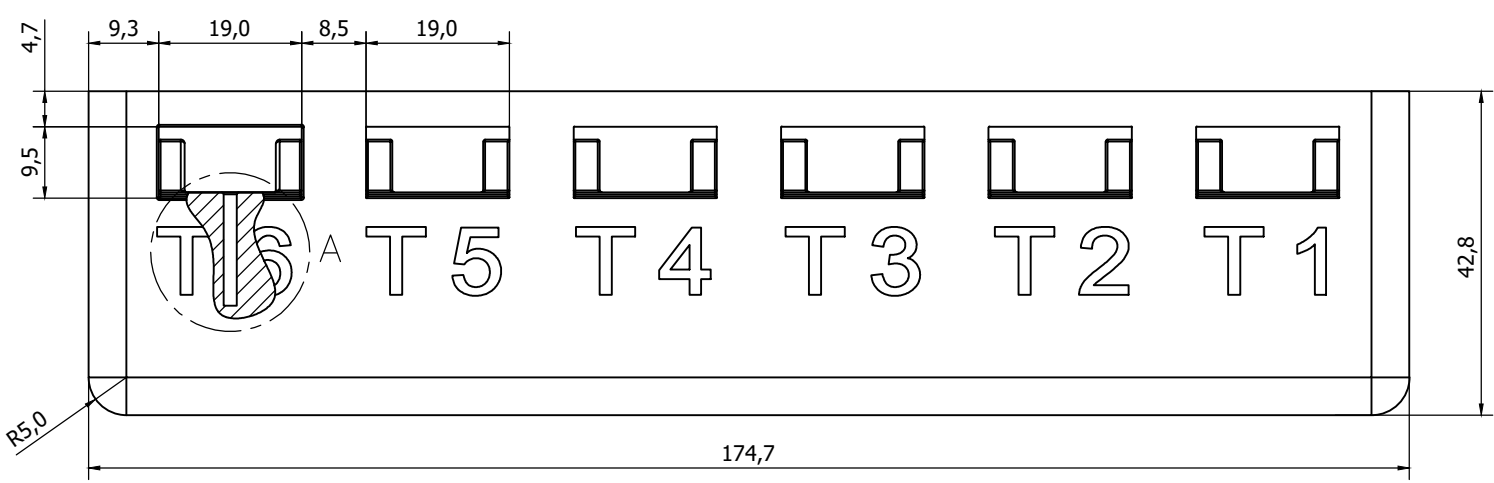
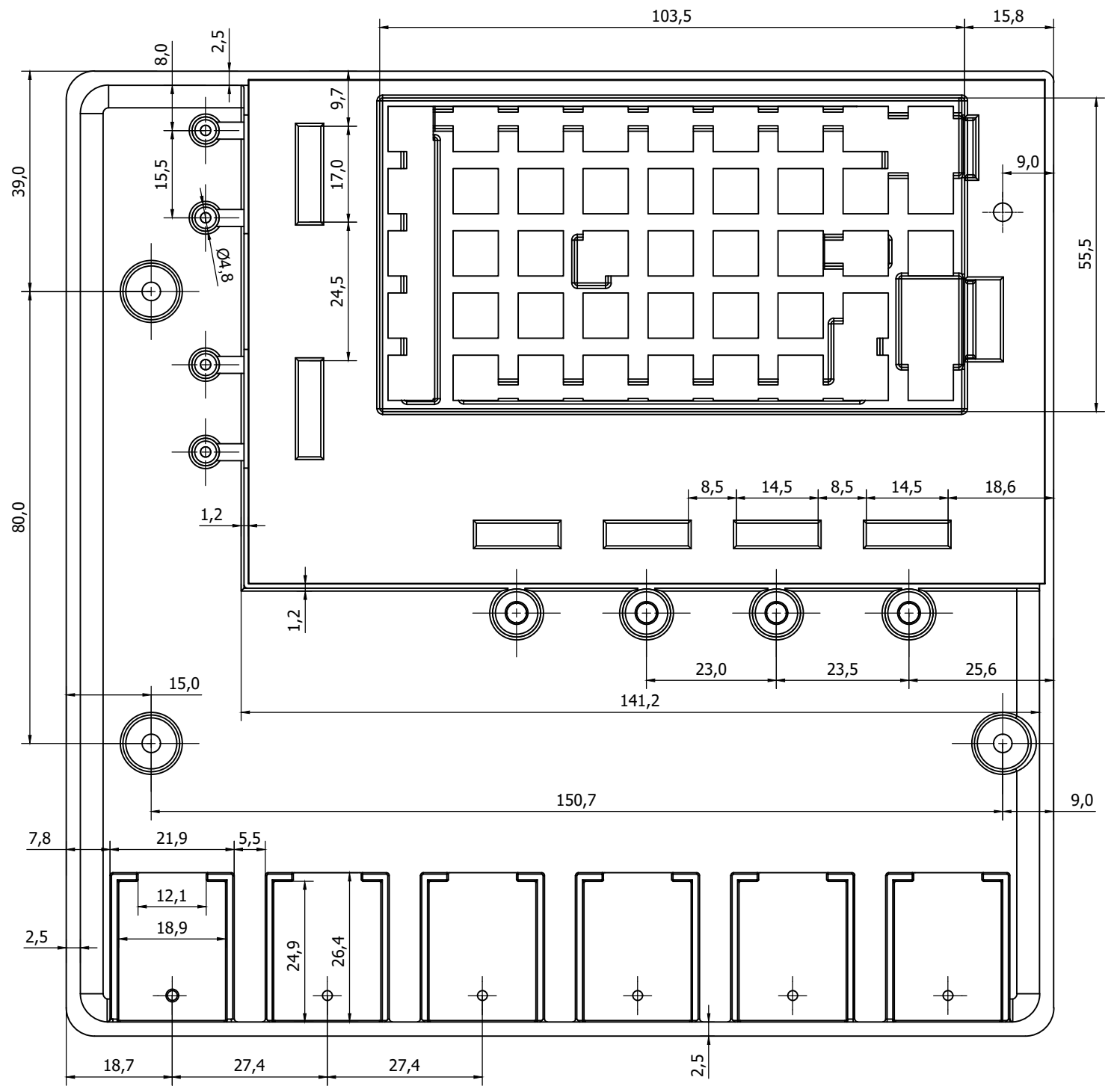


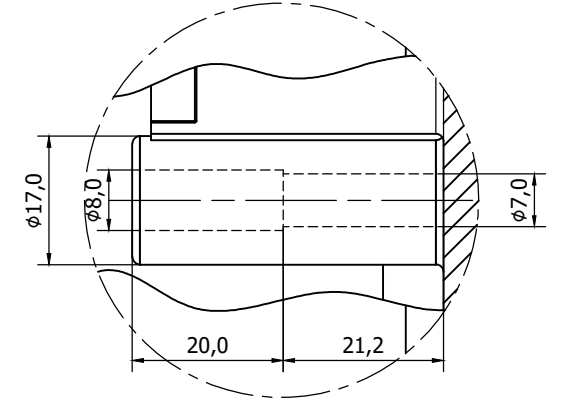
Figura VI. VI Conexión de termopares y módulos MAX soldados en la placa PCB
(Fuente: Propia)

ANEXO VII

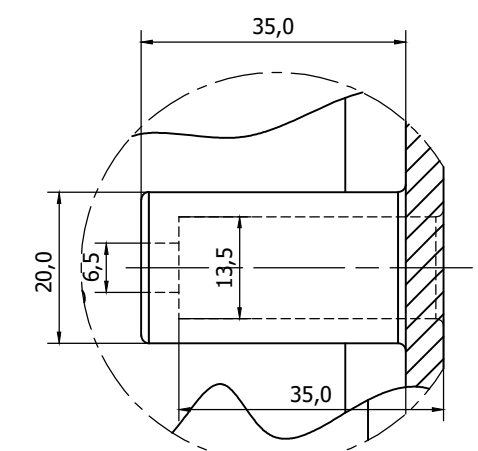
Planos del estuche del prototipo y distribución de componentes



Detalle A
Escala: 2:1

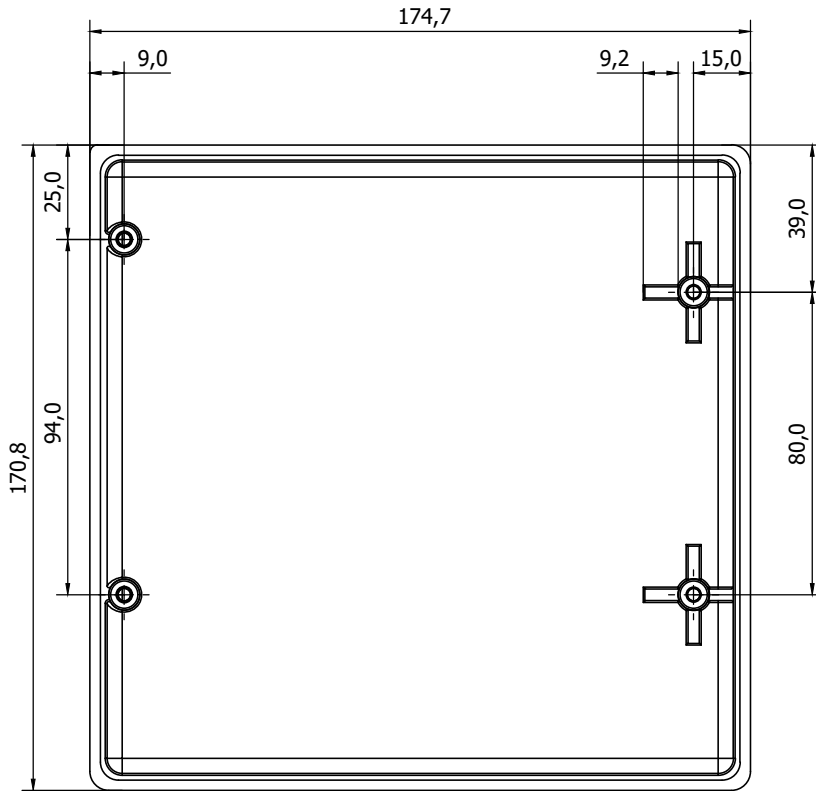


Detalle B
Escala: 2:1

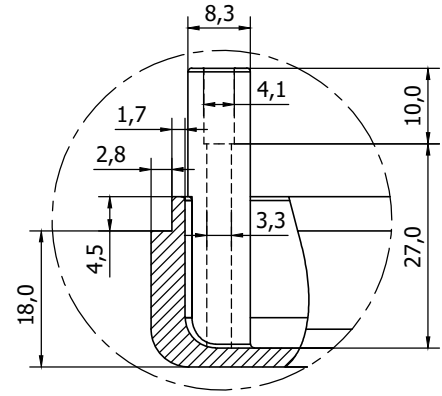


Detalle C
Escala: 2:1

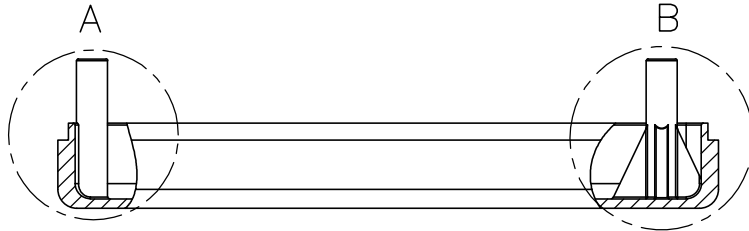
Trat. Térmico	Ninguno	E.P.N	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		DIB.	Pillajo Omar	
Material: PLA PLUS NEGRO		Tol. Gral: ±0.1	Escala: 1:1	DIS.	Pillajo Omar
BASE DEL ESTUCHE		CCT-001		REV.	Ing. Miguel Ortega
					Fecha: 23/08/2022



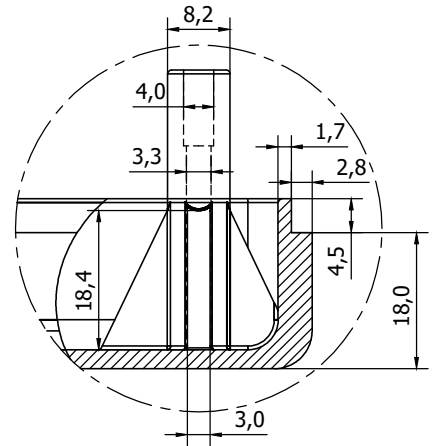
VISTA SUPERIOR



DETALLE A
ESCALA: 1:1

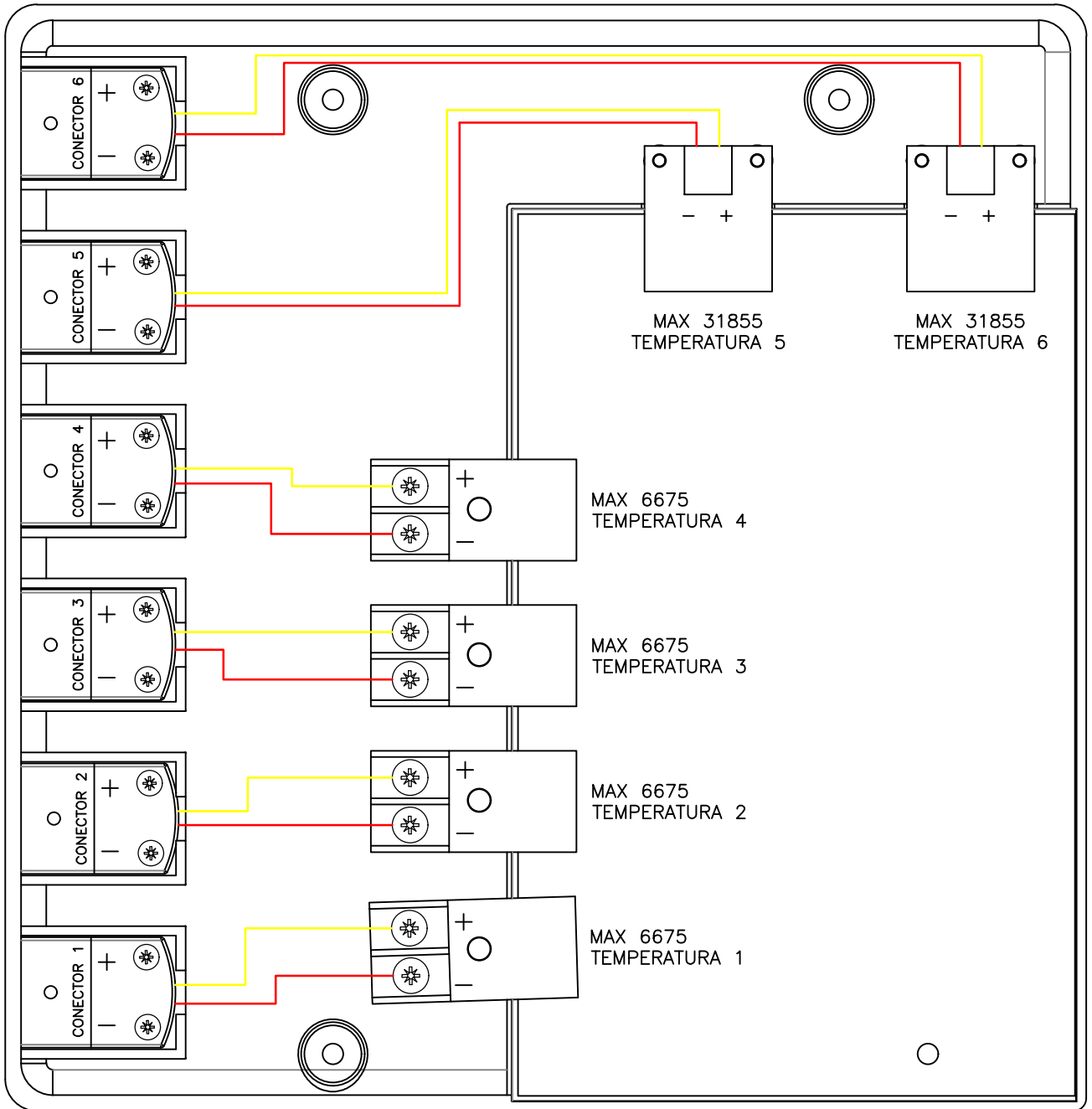


VISTA FRONTAL



DETALLE B
ESCALA: 1:1

Trat. Térmico	Ninguno	E.P.N	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno			
Material: PLA PLUS NEGRO		Tol. Gral: ±0.1	Escala: 1:2	DIB. Pillajo Omar
				DIS. Pillajo Omar
				REV. Ing. Miguel Ortega
TAPA DEL ESTUCHE			CCT-002	Fecha: 23/08/2022



Trat. Térmico	Ninguno	E.P.N	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		DIB.	Pillajo Omar
Material: Sin material		Tol. Gral: ±0.1	Escala: 1:1	DIS. Pillajo Omar
DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES		CCT-003		REV. Ing. Miguel Ortega
				Fecha: 23/08/2022

ANEXO VIII

Costo en inversión del equipo

Ítem	Cantidad	Descripción	Precio unitario [\$]	Precio total [\$]
1	8	Acoples hembra para tornillo M3	\$ 0,50	\$ 4,00
2	1	Arduino Mega 2560 genérico	\$ 24,00	\$ 24,00
3	30	Cables jumppers L=10 cm macho-hembra	\$ 0,10	\$ 3,00
4	1	Cinta termofundible 1 metro	\$ 1,00	\$ 1,00
5	6	Conector Termopar Tipo K hembra	\$ 6,00	\$ 36,00
6	6	Conector Termopar Tipo K macho	\$ 6,00	\$ 36,00
7	2	Espadines macho de 15 mm 8 pines	\$ 0,25	\$ 0,50
8	8	Espadines macho de 20 mm 6 pines	\$ 0,75	\$ 6,00
9	2	Horas de tutoría y diseño en placas PCB	\$ 10,00	\$ 20,00
10	1	Impresión de placa PCB dimensiones 90x140 mm	\$ 14,00	\$ 14,00
11	2	Módulo MAX 31855 para termopar tipo K	\$ 17,99	\$ 35,98
12	4	Módulo MAX 6675 para termopar tipo K	\$ 8,75	\$ 35,00
13	1	Pasta térmica ANERA 15 g	\$ 4,70	\$ 4,70
14	1	Protoboard pequeño 400 puntos	\$ 2,99	\$ 2,99
15	136	Puntos de soldadura	\$ 0,15	\$ 20,40
16	6	Resortes para pinzas	\$ 3,00	\$ 18,00
17	20	Tornillos para madera D=3 mm	\$ 0,05	\$ 1,00
18	20	Tornillos M2	\$ 0,15	\$ 3,00
19	6	Tornillos M3	\$ 0,15	\$ 0,90
Total				\$266,47
Ítem	Horas de impresión [h]	Descripción	Precio por hora [\$ /h]	Precio total [\$]
1	14	Impresión de base	\$ 2,50	\$ 35,00
2	5,5	Impresión de pinza en resina tough 1500	\$ 12,00	\$ 66,00
3	8	Impresión de tapa	\$ 2,50	\$ 20,00
Total				\$121,00
Total del proyecto				\$387,47

ANEXO IX

Pruebas preliminares en el equipo Chiller de la ESFOT

El equipo chiller de la ESFOT, es un equipo de refrigeración enfriado por aire que cuenta con los siguientes componentes principales:

- Compresor
- Chiller
- Ventilador
- Filtro deshidratador
- Válvula de expansión
- Evaporador

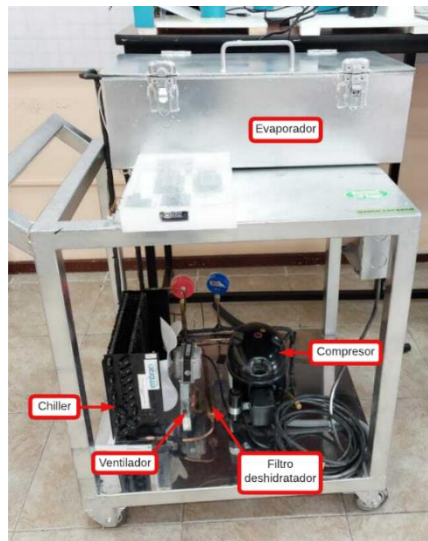


Figura IX. I Equipo de refrigeración Chiller
(Fuente: Propia)

Es un equipo muy compacto y consta de la siguiente instrumentación:

- Manómetros de alta y baja presión: Para el desarrollo de cálculos posteriores, la presión registrada en los manómetros de sumarse con la presión barométrica para Quito.



Figura IX. II Ubicación de manómetros en tubería de absorción y tubería de descarga
(Fuente: Propia)

- Termopares: Estos termopares están conectados en 4 puntos del Sistema y los mismos están conectados en forma abierta. Además, están aislados del ambiente y cada uno cuenta con un módulo MAX6675 asociado.



Figura IX. III Ubicación de termopares en el equipo Chiller
(Fuente: Propia)

- Sistema de monitoreo para lectura de temperaturas superficiales y temperatura interna del fluido.

El desarrollo de las pruebas experimentales con relación a la temperatura registrada se realiza para tres casos.

- Caso 1: Termopares sin aislamiento
- Caso 2: Termopares con pasta térmica
- Caso 3: Termopares con pasta térmica y aislamiento

Los tres casos son necesarios debido a que, la temperatura ambiente influye con los resultados de temperatura superficial.

Para cada caso se han considerado las siguientes condiciones:

- Temperatura ambiente: 19 °C
- Tiempo de estabilización de la temperatura: 15 minutos
- Temperatura en la cabina del evaporador: 11 °C aprox.
- Carga interna en el evaporador: 6 litros de agua.
- Tiempo de lectura de datos: 5 minutos
- Tipo de refrigerante: R134a

En cada caso se tabulan las temperaturas obtenidas del programa Cooling Cycle Tester (CCT) cada 30 segundos y se determina un valor promedio de la temperatura. La temperatura promedio se utiliza para comparar con los datos obtenidos del sistema de control de temperatura del equipo. La ubicación de los termopares según la Figura IX. IV es preliminar de acuerdo a las ubicaciones experimentales sugeridas en el trabajo.

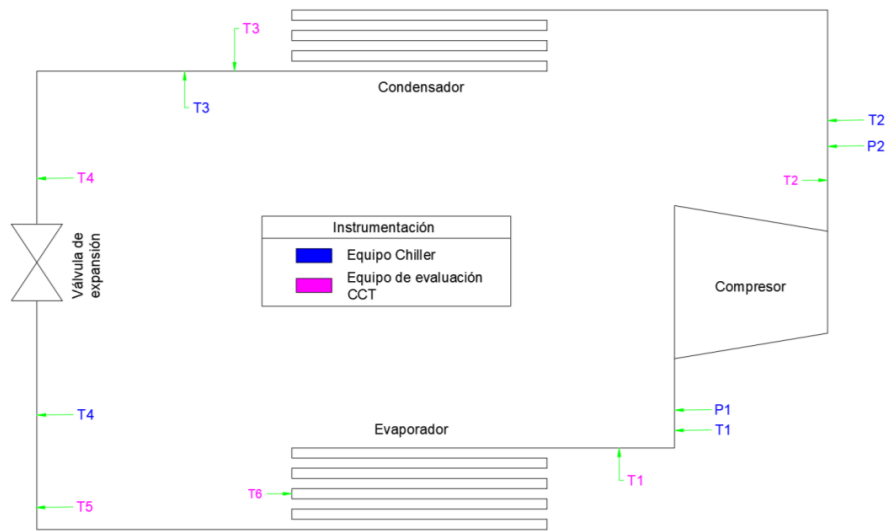


Figura IX. IV Diagrama de instrumentación en el equipo Chiller
(Fuente: Propia)

Caso 1: Termopares sin aislamiento

Los valores de temperatura obtenidos en cada posición se tabulan en la Tabla IX. I.

Tabla IX. I Temperaturas registradas en los termopares sin aislamiento

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	292,73	308,10	292,26	291,33	261,75	267,75
60	292,73	308,10	292,01	291,33	261,50	267,75
90	292,23	308,10	292,01	291,08	261,75	267,75
120	292,48	308,10	291,76	291,33	261,75	267,75
150	293,33	307,85	292,26	291,08	261,75	267,75
180	292,98	308,10	292,01	291,33	261,75	267,75
210	293,23	307,85	292,51	291,58	261,50	267,75
240	293,23	307,85	292,51	291,33	261,50	267,75
270	292,23	308,10	291,76	291,33	261,75	267,75
300	293,23	307,60	292,01	291,08	261,75	267,75
Promedio	292,84	307,98	292,11	291,28	261,68	267,75

(Fuente: Propia)

Para registrar las temperaturas, se utiliza capturas de pantalla del CCT activando el diagrama de componentes para visualizar el posicionamiento de cada termopar y la temperatura en el instante registrado.

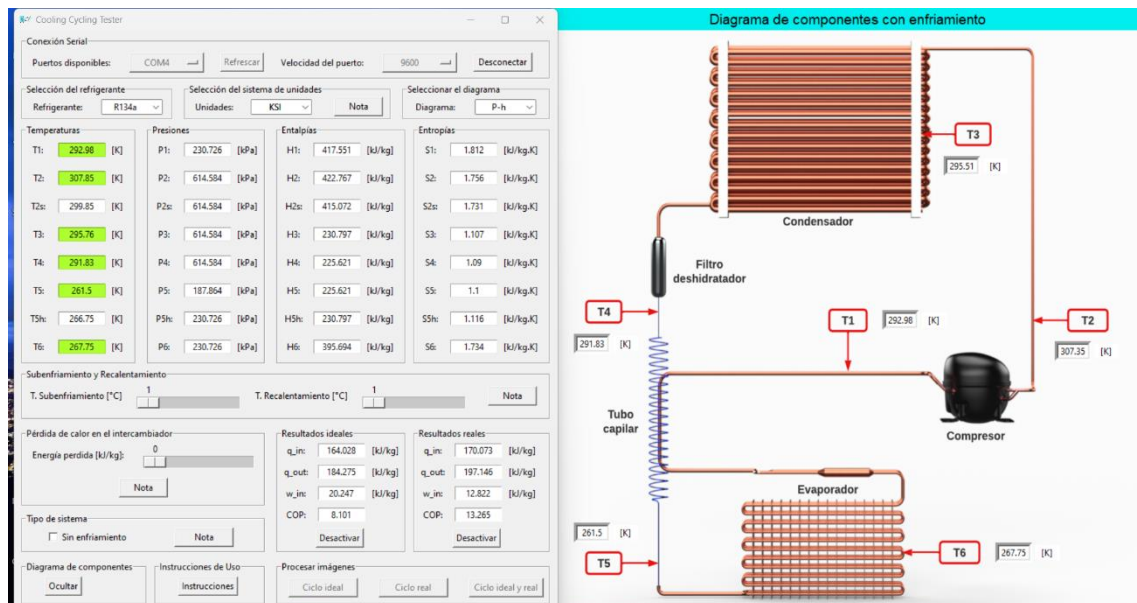


Figura IX. V Registro de temperaturas usando Cooling Cycle Tester
(Fuente: Propia)

Caso 2: Termopares con pasta térmica

Al implementar la pasta térmica en los termopares, ayuda a eliminar el aire entre la tubería de cobre y el alambre del termopar, mejorando la lectura de datos.

Tabla IX. II Temperaturas registradas en los termopares con uso de pasta térmica

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	291,73	313,1	293,76	292,83	259,25	262,5
60	291,98	312,85	293,76	292,58	259,25	262,25
90	291,23	312,35	293,26	292,58	259,25	262,5
120	291,48	313,1	293,76	292,33	259,25	262,25
150	291,48	312,85	293,01	292,08	259,5	262,75
180	291,48	313,35	293,51	292,33	259,5	262,75
210	291,48	312,6	293,76	292,58	259,5	262,75
240	291,23	313,35	293,26	292,83	259,5	263
270	291,73	313,1	293,51	292,33	259,5	262,75
300	291,48	313,1	293,26	292,83	259,5	262,5
Promedio	291,53	312,98	293,49	292,53	259,40	262,60

(Fuente: Propia)

Caso 3: Termopares con pasta térmica y aislamiento.

Uno de los problemas es el flujo del aire proporcionado por el ventilador para los puntos 3 y 4. Para solventar esta situación se usó esponja aislante y se le aseguró usando taipe. Al realizar el aislamiento se obtuvieron los resultados de la Tabla IX. III

Tabla IX. III Temperaturas registradas en termopares con uso de pasta térmica y aislamiento.

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	291,23	313,35	293,76	292,83	259,5	262,25
60	291,23	313,35	294,01	292,58	259,25	262,25
90	290,73	312,6	293,76	292,83	259,25	262,5
120	290,98	313,35	294,26	292,58	259,25	262,25
150	290,73	313,35	294,01	292,58	259,5	262,75
180	290,98	313,6	293,51	292,83	259,5	262,75
210	290,98	312,85	294,26	292,83	259,5	262,75
240	290,73	313,6	293,76	293,08	259,5	263
270	291,23	313,35	294,01	293,08	259,5	262,75
300	290,98	313,1	293,76	292,83	259,5	262,75
Promedio	290,98	313,25	293,91	292,81	259,43	262,60

(Fuente: Propia)

Temperaturas registradas en el equipo Chiller

Para comparar los resultados, primero se tabulan las temperaturas registradas en el sistema de control del equipo Chiller. Las temperaturas son registradas cada 30 segundos durante cinco minutos.

Tabla IX. IV Temperaturas registradas en el control de temperaturas del Chiller

Tiempo [s]	Temperatura [K]		
	T1	T2	T3
30	286,15	318,90	293,90
60	285,40	318,90	293,65
90	285,90	318,90	293,40
120	285,65	319,15	294,15
150	285,65	319,40	294,15
180	285,40	319,40	294,15
210	286,15	319,15	294,15
240	285,40	319,15	294,15
270	285,65	318,90	294,40
300	285,40	319,40	294,15
Promedio	285,68	319,13	294,03

(Fuente: Propia)

Comparativa de resultados

Los valores por comparar son las temperaturas T1, T2 y T3 para los tres casos definidos. Se toma como referencia solo las tres temperaturas debido a que el cuarto termopar del equipo Chiller no registraba temperaturas menores a 0 °C. Para cada caso se calcula el porcentaje de error con respecto a los valores del equipo instrumentado.

Tabla IX. V Comparativa en porcentajes de error entre los termopares para cada caso

	Temperatura [K]		
	T1	T2	T3
Referencial	285,68	319,13	294,03
Caso 1: Sin aislamiento	292,84	307,98	292,11
Caso 2: Pasta térmica	291,53	312,98	293,49
Caso 3: Pasta térmica y aislamiento	290,98	313,25	293,91
% error			
Caso 1: Sin aislamiento	2,51	3,49	0,65
Caso 2: Pasta térmica	2,05	1,93	0,18
Caso 3: Pasta térmica y aislamiento	1,86	1,84	0,04

(Fuente: Propia)

El máximo porcentaje de error encontrado es de 3.49 %, en la temperatura de la tubería de descarga para el caso en que no se utiliza pasta térmica, ni aislante térmico. El error registrado se debe que el flujo de aire; que retorna del ventilador, afecta la temperatura superficial de la tubería. Este error se reduce, al implementar pasta y aislante térmicos en los termopares. Entre la pasta y el aislante térmicos, no existe una gran diferencia como es para el caso sin aislamiento. Además, no siempre va a ser factible aislar totalmente las pinzas con los termopares, por ende, se decide que las pruebas siguientes, solo se utilizara pasta térmica para mejorar la lectura de datos.

Caída de temperatura posterior al filtro deshidratador

Con respecto al flujo de aire por parte del ventilador, la tubería posterior al filtro deshidratador tiene una longitud de 1.6 m hasta llegar a la válvula de expansión. En esta longitud, 1 [m] de tubería está expuesta a la temperatura ambiente y 60 [cm] se encuentran aislados. Por ende, es evidente que va a existir un gradiente de caída de temperatura en la tubería expuesta al ambiente. Para determinar la caída de temperatura, se procede a realizar tres pruebas a lo largo de la tubería, según el esquema de la Figura IX. VI.

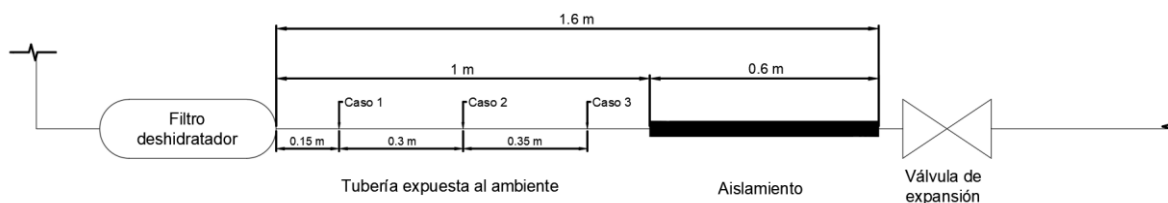


Figura IX. VI Diagrama de conexión entre filtro deshidratador y válvula de expansión

(Fuente: Propia)

Las temperaturas para cada caso se tabulan en la Tabla IX. VI.

Tabla IX. VI Caída de temperatura en la tubería de conexión entre el filtro deshidratador y válvula de expansión.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Temperatura [°C]	292,2	291,5	292,7

(Fuente: Propia)

Según la Tabla IX. VI, la diferencia de temperatura entre la salida del condensador y la entrada a la válvula de expansión es de 3 °C. Este valor de temperatura se considera como temperatura de subenfriamiento en la evaluación final del sistema.

Evaluación del sistema según la instrumentación del equipo Chiller

Para evaluar el sistema de refrigeración, se calculan las propiedades del ciclo de refrigeración, en primera instancia se calcula la presión de alta (condensador) y baja (evaporador) del sistema.

$$P_{baja} = (15 + 10.44)psi = 25.44 psi \cong 175.40 kPa$$

$$P_{alta} = (75 + 10.44)psi = 85.44 psi \cong 589.088 kPa$$

Al calcular las presiones del sistema, estas se tabulan y se calculan las demás propiedades del refrigerante con base en las temperaturas y presiones registradas del equipo. El equipo consta de cinco estados determinados con la propia instrumentación.

Tabla IX. VII Propiedades del refrigerante según instrumentación del equipo Chiller

Propiedad	Estado				
	1	2	3	4	5
Temperatura [K]	285,68	319,13	294,03	259,80	259,80
Presión [Pa]	175402,69	589088,29	589088,29	175402,69	175402,69
Entalpía [J/kg]	412436,95	434726,64	228706,80	228706,80	390634,35
Entropía [J/kg.K]	1815,80	1797,54	1100,41	1112,53	1735,81
Calidad			0,00		1,00

(Fuente: Propia)

Los cálculos asociados a los procesos intervinientes se desarrollan a continuación:

- Calor de entrada:

$$q_{in} = h_5 - h_4$$

$$q_{in} = (390634.35 - 228706.80) \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$q_{in} = 161927.55 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- Calor de salida:

$$q_{out} = h_2 - h_3$$

$$q_{out} = (434726.64 - 228706.80) \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$q_{out} = 206019.84 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- Trabajo del compresor:

$$w_{in} = \frac{n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)}{n - 1}$$

$$w_{in} = \frac{1.129 \cdot 81.49 \cdot (319.13 - 285.68)}{1.129 - 1}$$

$$w_{in} = 24407.9 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- Coeficiente de desempeño (COP):

$$COP = \frac{q_{in}}{w_{in}} = \frac{161927.55}{24407.9} = 6.63$$

Las propiedades calculadas, se tabulan en una hoja de cálculo de Excel.

Tabla IX. VIII Resultados del sistema según la instrumentación del equipo

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	161927,55	[J/kg]
Calor de salida	206019,84	[J/kg]
Trabajo	24407,9	[J/kg]
COP	6,63	

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Evaluación usando Cooling Cycle Tester sin ajustes de temperatura

Sin realizar ningún ajuste de temperatura de subenfriamiento o recalentamiento y pérdida de energía, se muestra en la Figura IX. VII el sistema evaluado usando el programa del Cooling Cycle Tester (CCT).

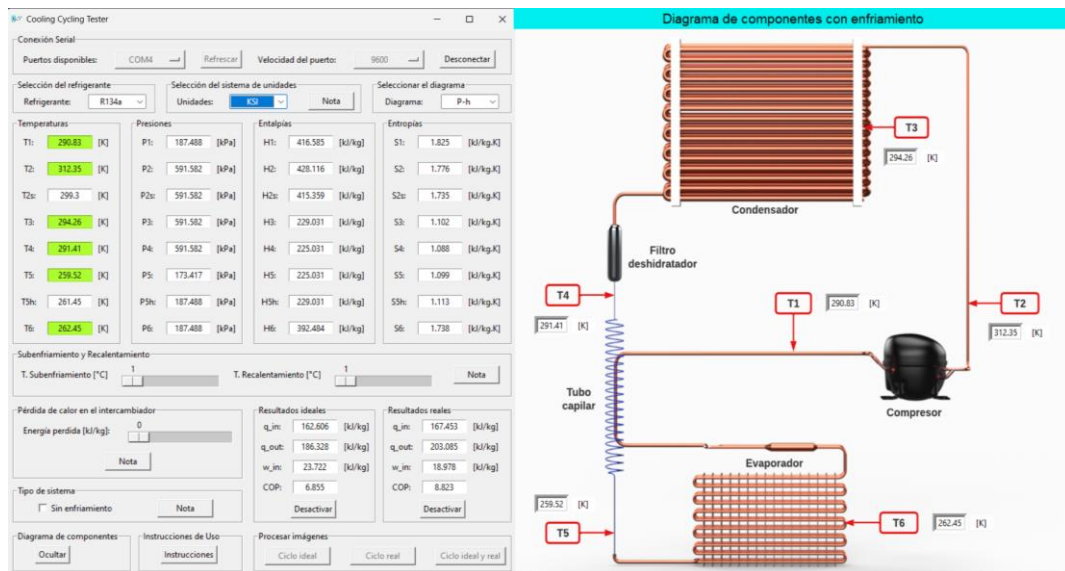


Figura IX. VII Evaluación del sistema usando Cooling Cycle Tester
(Fuente: Propia)

Las propiedades del refrigerante se registran en una hoja de cálculo de Excel.

Tabla IX. IX Propiedades del refrigerante calculados con Cooling Cycle Tester

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	290,8	313,0	294,3	291,4	259,4	262,6
Presión [Pa]	196284,4	591581,8	591581,8	591581,8	196284,4	196284,4
Entalpía [J/kg]	416402,3	428726,7	229031,0	225031,1	181817,9	392332,9
Entropía [J/kg.K]	1820,8	1778,2	1101,5	1087,8	932,0	1733,7
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Con las propiedades registradas, se procede a calcular calores de entrada y salida, trabajo del compresor y COP. Estas se tabulan en una hoja de cálculo de Excel

Tabla IX. X Calculo de resultados del proceso sin ajuste

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	167301,72	[J/kg]
Calor de salida	203695,54	[J/kg]
Trabajo	16800,1	[J/kg]
COP	9,96	

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Evaluación usando Cooling Cycle Tester con ajustes de temperatura

El ajuste de temperatura se lo realiza con respecto a la presión alcanzada en el evaporador. Para ello, se calcula la temperatura correspondiente a la presión en el evaporador y el refrigerante como gas saturado (Calidad = 1). El cálculo se lo realiza con la librería Coolprop de Excel.

Tabla IX. XI Temperatura alcanzada en el evaporador según la presión de baja

	Propiedad		
	Presión [kPa]	Calidad (x)	T. evaporador [K]
Valor	161,61	1	257,80

(Fuente: Propia)

Al calcular la temperatura en el evaporador, para que la temperatura del evaporador llegue a tener esta temperatura, se debe aumentar la temperatura de recalentamiento, hasta que la temperatura en el estado 5 que baja isoentálpicamente (TH5), sea similar a la temperatura mostrada en la Tabla IX. XI.

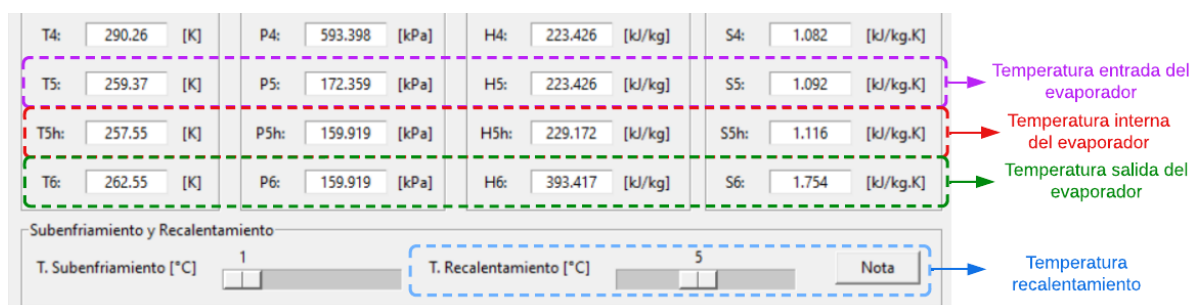


Figura IX. VIII Ajuste con temperatura de recalentamiento en CCT

(Fuente: Propia)

Al ajustar la temperatura, se procede a calcular las propiedades del refrigerante en los diferentes estados del sistema.

Tabla IX. XII Propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	290,8	313,0	294,3	291,4	259,5	262,5
Presión [Pa]	159256,6	591581,8	591581,8	591581,8	159256,6	159256,6
Entalpía [J/kg]	417167,0	428726,7	229031,0	225031,1	390920,7	389199,8
Entropía [J/kg.K]	1839,8	1778,2	1101,5	1087,8	1744,3	1737,7
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Con las propiedades determinadas, se procede a calcular el calor de entrada y salida, el trabajo del compresor y el COP del equipo Chiller.

Tabla IX. XIII Resultados calculados para los procesos del sistema

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	164168,71	[J/kg]
Calor de salida	203695,54	[J/kg]
Trabajo	17728,4	[J/kg]
COP	9,26	

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Error porcentual para todos los casos de evaluación

El error porcentual se determina, considerando que el equipo Cooling Cycle Tester utiliza solo temperaturas superficiales, y estas pueden verse afectadas al ser influenciadas por corrientes de aire como el ventilador del Chiller. Por esta razón, se realizaron diferentes evaluaciones para compararse con respecto a los resultados obtenidos con la propia instrumentación del equipo.

Tabla IX. XIV Error porcentual para cada caso de evaluación

Resultados	Calor de entrada [J/kg]	Calor de salida [J/kg]	Trabajo [J/kg]	COP
Equipo Instrumentado	161927,5	206019,8	24407,9	6,63
Cooling Cycle Tester sin ajuste	167301,7	203695,5	16800,1	9,96
Cooling Cycle Tester con ajuste	164168,7	203695,5	17728,4	9,26
% Error				
Cooling Cycle Tester sin ajuste	3,32	1,13	31,17	50,11
Cooling Cycle Tester con ajuste	1,38	1,13	27,37	39,58

(Fuente: Propia)

Según la Tabla IX. XIV, el error para los calores de entrada y salida no son muy desviados con respecto a los resultados generados por la propia instrumentación. Sin embargo, con respecto al trabajo del compresor existe un error considerable para ambos casos de evaluación. Esto se debe que la temperatura ambiente influye bastante en los datos de temperatura superficial. Sin embargo, el prototipo no se desvía notablemente de los resultados puesto que mediante un porcentaje de confiabilidad se pueden ajustar los resultados a los reales.

Mediante un diagrama T-s se representa los tres casos de evaluación realizados y se observa donde se encuentra el error causal.

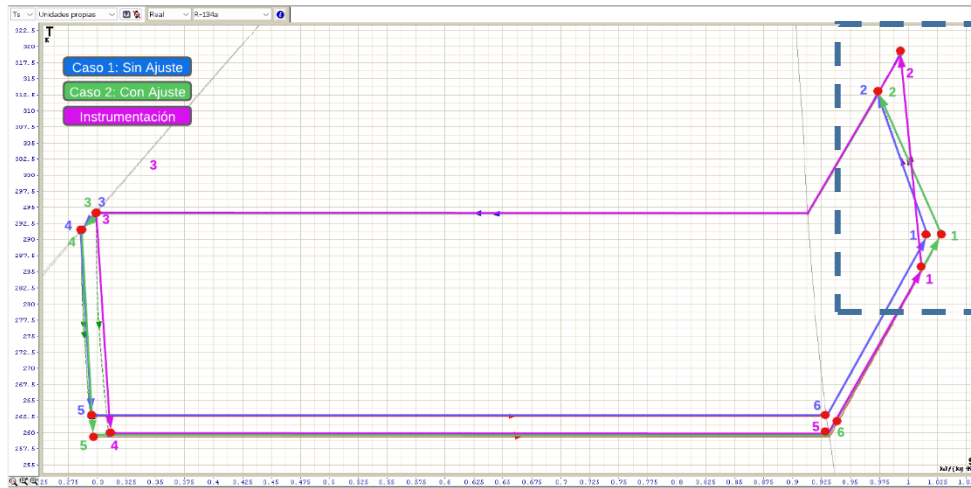


Figura IX. IX Diagrama T-s para los diferentes casos de evaluación.

(Fuente: Propia)

En la Figura IX. IX el error se produce en el proceso de compresión (Estados 1 y 2). Analizando los estados 1 y 2 para ambos casos, son más confiables los resultados obtenidos en el proceso de compresión del equipo Chiller, considerando que, en ambos estados, la temperatura se subestima. En el caso de la compresión usando el Cooling Cycle Tester, la temperatura en el estado 1 se sobreestima y en el estado 2 se subestima. Gráficamente, el proceso de compresión sin influencia de la temperatura ambiente se grafica en la Figura IX. X

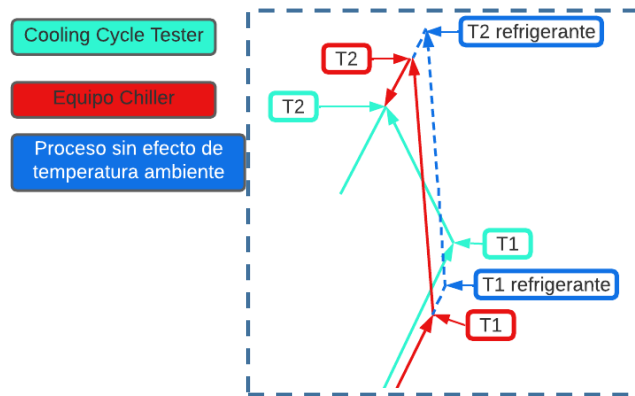


Figura IX. X Proceso de compresión sin influencia de la temperatura ambiente.

(Fuente: Propia)

Si se analiza el proceso de compresión sin influencia de la temperatura ambiente, las condiciones de entrada de temperatura y salida del compresor aumentarían paralelas al proceso de compresión con la instrumentación del equipo Chiller. No pude ser similar a la del Cooling Cycle Tester, puesto que no se tiene un instrumento para medir presión y además los termopares no están completamente aislados.

ANEXO X

Pruebas preliminares en el equipo de refrigeración del laboratorio de termodinámica FIM

El equipo de refrigeración de laboratorio de termodinámica es un equipo complejo en cuanto a equipamiento que posee, en comparación al sistema de refrigeración convencional.



Figura X. I Equipo de refrigeración del laboratorio de termodinámica FIM.

(Fuente: Propia)

Este equipo de refrigeración tiene la capacidad de trabajar con cuatro tipos de evaporadores:

- Banco de hielo
- Aire acondicionado
- Cámara frigorífica
- Banco de resistencias

El equipo es extenso en cuanto a accesorios y componentes extra que dispone. Sin embargo, dispone de los cuatro componentes principales de refrigeración, estando la mayoría de estos, en la unidad condensadora.

La instrumentación del equipo no es extensa, puesto que cuenta con los siguientes instrumentos:

- 4 manómetros y 2 sensores digitales de presión
- 5 sensores de temperatura y 2 sensores digitales de temperatura

La ubicación de cada instrumento se muestra en la Figura X. II. Los sensores de temperatura del equipo están en la misma posición de los lugares de interés que se

requiere para evaluar el equipo usando el Cooling Cycle Tester. En este caso, solo se añade el termopar 6 que nos permite medir la temperatura en la mitad del evaporador.



Figura X. II Esquema de ubicación de instrumentos en el equipo de refrigeración
(Fuente: Propia)

Para validar los resultados del equipo, se realizaron dos pruebas. La primera consiste en ubicar los termopares según lo definido en el desarrollo del trabajo y evaluar el ciclo de refrigeración sin ajustar los resultados. La segunda es evaluar el ciclo ajustando las condiciones de subenfriamiento y recalentamiento del equipo.

Las condiciones para el desarrollo de las pruebas son:

- Temperatura ambiente: 22 °C
- Tipo de refrigerante: R134a
- Tiempo de estabilización de temperatura: 15 minutos
- Tiempo de lectura de datos: 5 minutos
- Tipo de evaporador: Banco de hielo

Evaluación del ciclo de refrigeración sin ajustes de temperatura

Para evaluar el sistema, se registraron durante 5 minutos las temperaturas usando Cooling Cycle Tester. Los datos de temperatura se tabulan en Tabla X. I.

Tabla X. I Datos de temperatura obtenidos mediante uso del Cooling Cycle Tester

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	282,57	307,45	305,69	302,69	275,94	278,64
60	282,32	306,95	305,69	302,69	275,94	278,64
90	282,57	307,45	305,44	302,44	275,94	278,64
120	282,32	307,45	305,44	302,44	275,94	278,89
150	282,32	307,45	305,44	302,44	275,94	278,64
180	282,32	306,95	305,44	302,44	275,94	278,89
210	282,07	307,45	304,44	301,44	275,94	278,64
240	282,32	307,20	304,94	301,94	276,44	278,64
270	282,07	306,95	304,94	301,94	276,44	278,64
300	282,57	306,70	304,94	301,94	275,94	278,64
Promedio	282,35	307,20	305,24	302,24	276,04	278,69

(Fuente: Propia)

Los datos de temperatura obtenidos se promedian y son referenciales para cálculos posteriores. Para determinar las propiedades del fluido, se utiliza la librería Coolprop de Excel bajo el mismo esquema de programación ejemplificado en ciertos apartados del contenido del trabajo. Las propiedades para cada estado del refrigerante se tabulan en la Tabla X. II.

Tabla X. II Propiedades del fluido para diferentes estados del sistema

Propiedad	Estados					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	282,3	307,2	305,2	302,2	276,0	278,7
Presión [Pa]	356270,6	817507,8	817507,8	817507,8	356270,6	356270,6
Entalpía [J/kg]	405160,8	417930,1	244753,5	240407,2	240407,2	401800,6
Entropía [J/kg.K]	1736,2	1720,7	1153,3	1139,0	1145,1	1724,2
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Los procesos del ciclo se calculan automáticamente mediante programación en Excel, teniendo por consiguiente los resultados presentados en la Tabla X. III.

Tabla X. III Cálculos de los procesos intervinientes en el ciclo

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	161393,4	[J/kg]
Calor de salida	177522,9	[J/kg]
Trabajo	15157,6	[J/kg]
COP	10,65	[--]

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Evaluación del ciclo de refrigeración con ajustes de temperatura

Al referirse con ajuste de temperatura, se relaciona a la temperatura de subenfriamiento y recalentamiento que se pueden modificar en la interfaz gráfica. Para el caso del subenfriamiento, al utilizar la unidad condensadora, este componente pierde bastante energía hacia el ambiente. Considerando está pérdida de energía, la temperatura de subenfriamiento se ajusta hasta obtener la temperatura ambiente en el estado 4 (T4). Para el caso de recalentamiento, la temperatura en el evaporador se ajusta teniendo como referencia la temperatura de los propios manómetros del equipo de refrigeración. Usando el slide de recalentamiento, se configura el estado 5 ideal (T5h) hasta la temperatura registrada en el manómetro de baja.



Figura X. III Ajuste de temperaturas usando Cooling Cycle Tester

(Fuente: propia)



Figura X. IV Temperatura en el evaporador según el manómetro del equipo de refrigeración

(Fuente: Propia)

Basándose en las configuraciones realizadas, las condiciones de evaluación del sistema son con temperatura de subenfriamiento de 6 °C y con 5 °C de recalentamiento. Bajo estas condiciones, se registra la temperatura usando Cooling Cycle Tester durante cinco minutos y los resultados se tabulan en la Tabla X. IV.

Tabla X. IV. Registro de temperaturas usando Cooling Cycle Tester

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	280,72	306,59	304,34	294,34	275,59	276,54
60	280,47	307,59	304,34	294,34	275,59	276,54
90	279,97	307,59	304,34	294,34	275,34	276,54
120	279,97	307,59	304,84	294,84	275,34	276,79
150	279,47	306,59	304,34	294,34	275,34	276,79
180	279,97	307,59	304,09	294,09	275,34	276,79
210	279,97	307,59	304,09	294,09	275,59	276,54
240	279,97	307,59	304,34	294,34	275,34	276,79
270	279,97	307,59	304,09	294,09	275,34	276,79
300	279,47	306,59	304,34	294,84	275,59	276,54
Promedio	280,00	307,29	304,32	294,37	275,44	276,67

(Fuente: Propia)

Con los resultados de temperatura obtenidos, se calculan las propiedades del refrigerante para los diferentes estados.

Tabla X. V Propiedades del refrigerante para distintos estados

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	280,0	307,3	304,3	294,4	275,4	276,7
Presión [Pa]	331959,7	796306,6	796306,6	796306,6	331959,7	331959,7
Entalpía [J/kg]	403671,7	418550,5	243409,6	229193,6	229193,6	400640,5
Entropía [J/kg.K]	1736,1	1724,5	1149,0	1101,5	1105,5	1725,2
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

El cálculo de los procesos del sistema se calcula usando la librería Coolprop de Excel y los resultados se tabulan

Tabla X. VI Resultados obtenidos del proceso

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	171446,9	[J/kg]
Calor de salida	189356,8	[J/kg]
Trabajo	16659,3	[J/kg]
COP	10,29	[--]

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Evaluación del ciclo de refrigeración según instrumentación del equipo

Al realizar la obtención de datos con la instrumentación del equipo, los resultados son más estables en comparación a los datos obtenidos en el Cooling Cycle Tester. Basándose en esto, solo se ha considerado obtener un valor referencial para realizar la evaluación del sistema.

Tabla X. VII Temperaturas obtenidas en el equipo de refrigeración

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	282,75	316,15	310,25	310,25	272,40	279,65
60	282,75	316,15	310,25	310,25	272,40	279,65
Promedio	282,75	316,15	310,25	310,25	272,40	279,65

(Fuente: Propia)

Para los datos de temperatura obtenidos en la Tabla X. VII, se calculan las propiedades del refrigerante en los diferentes estados usando el Coolprop del Excel. A diferencia de los

cálculos realizados con el Cooling Cycle Tester, en estos cálculos la propiedad independiente intensiva es la presión registrada en los manómetros.

Tabla X. VIII Propiedades para los diferentes estados del sistema

Propiedad	Estados					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	282,8	316,2	310,3	310,3	272,4	279,7
Presión [Pa]	210000,0	1010000,0	1010000,0	1010000,0	210000,0	210000,0
Entalpía [J/kg]	409151,1	422985,5	252091,0	252091,0	252091,0	406492,0
Entropía [J/kg.K]	1790,3	1722,8	1176,6	1176,6	1198,0	1780,8

(Fuente: Propia)

Con las propiedades de los estados definidos, se calcula los diferentes procesos intervinientes del sistema.

Los cálculos asociados a los procesos intervinientes se desarrollan a continuación:

- Calor de entrada:

$$q_{in} = h_6 - h_5$$

$$q_{in} = (406492 - 252091.0) \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$q_{in} = 154401 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- Calor de salida:

$$q_{out} = h_2 - h_4$$

$$q_{out} = (422985.5 - 252091.0) \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$q_{out} = 170894.5 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- Trabajo del compresor:

$$w_{in} = \frac{n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)}{n - 1}$$

$$w_{in} = \frac{1.126 \cdot 81.49 \cdot (316.2 - 282.8)}{1.126 - 1}$$

$$w_{in} = 24323.08 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- Coeficiente de desempeño (COP):

$$COP = \frac{q_{in}}{w_{in}} = \frac{154417.4}{24323.08} = 6.348$$

Tabla X. IX Resultados del proceso usando la instrumentación del equipo

Resultados del proceso

Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	154417,4	[J/kg]
Calor de salida	170953,7	[J/kg]
Trabajo	24323,8	[J/kg]
COP	6,35	[--]

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Error porcentual en el registro de temperatura para los diferentes casos

Para poder determinar la fiabilidad de los resultados obtenidos, se calcula el porcentaje de error para cada caso de temperatura, teniendo como referencia los valores registrados de los sensores digitales del equipo del laboratorio.

Tabla X. X Error porcentual en las temperaturas registradas para los diferentes casos de evaluación

Denominación	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Referencial	282,69	316,15	310,22	310,21	272,25	279,60
Caso 1: Sin ajuste	282,35	307,20	305,24	302,24	276,04	278,69
Caso 2: Con ajuste	280,00	307,29	304,32	294,37	275,44	276,67
% Error						
Caso 1: Sin ajuste	0,12	2,83	1,61	2,57	1,39	0,33
Caso 2: Con ajuste	0,95	2,80	1,90	5,11	1,17	1,05

(Fuente: Propia)

Según la Tabla X. X, el error porcentual más evidente es de 5.11 % para el caso con ajuste. Este error es intencional debido a que se asume un subenfriamiento previo a la entrada del dispositivo de expansión, y este valor se configura hasta que llegue a igualarse a la temperatura ambiente.

Error porcentual de los procesos para cada caso de evaluación

A pesar de que no exista un porcentaje de error considerable para cada caso en las temperaturas, se verifica si el mínimo error obtenido influye a los resultados de los procesos principales del ciclo.

Tabla X. XI Error porcentual para cada caso de evaluación

Resultados	Calor de entrada [J/kg]	Calor de salida [J/kg]	Trabajo [J/kg]	COP
Equipo Instrumentado	154417,4	170953,7	24303,8	6,4
Cooling Cycle Tester sin ajuste	161393,4	177522,9	15157,6	10,6
Cooling Cycle Tester con ajuste	171446,9	189356,8	16659,3	10,3
% Error				
Cooling Cycle Tester sin ajuste	4,5	3,8	37,6	67,6
Cooling Cycle Tester con ajuste	11,0	10,8	31,5	62,0

(Fuente: Propia)

Según la Tabla X. XI, es evidente que el error para cada caso sea alto debido a que el instrumento se realizó basándose en el estudio de un refrigerador convencional. Como el equipo de laboratorio de termodinámica es un equipo más complejo con fines didácticos, era de esperarse que los resultados sean muy alejados con respecto al caso de estudio.

Uno de los principales problemas en la evaluación fue el espacio donde se realizó la evaluación del equipo. No es lo mismo evaluar el equipo en un cuarto cerrado comparado con un galpón. A esto se suma la inadecuada ubicación de los sensores para evaluar el equipo, puesto que el flujo de aire del ventilador de la unidad condensadora afectaba a dos sensores ubicados en la salida del compresor y la salida del condensador.

Dentro del análisis, el compresor es el que evidencia si se está consumiendo mayor o menor cantidad de trabajo y esta se le relaciona con la energía eléctrica. Esquemáticamente se realiza el análisis del comportamiento de la compresión para los diferentes casos.

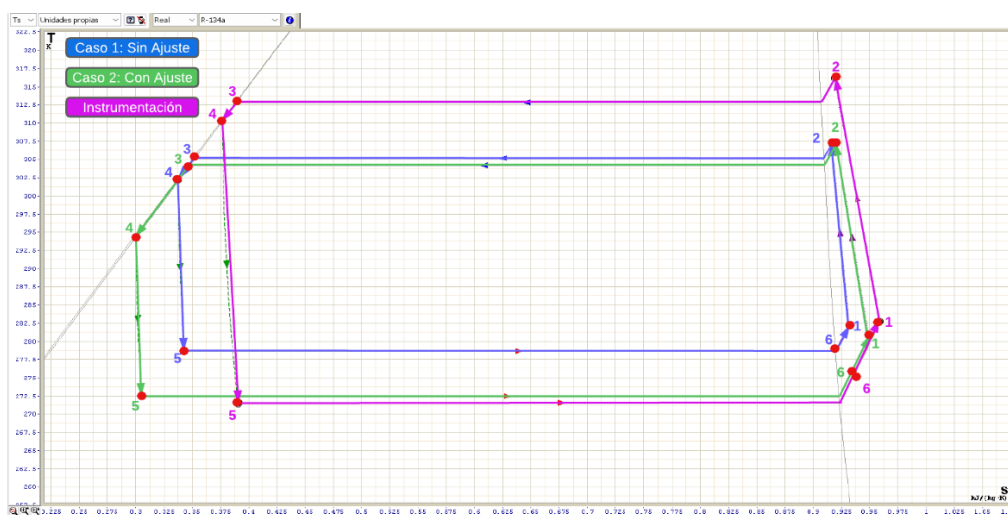


Figura X. V Diagrama T-s para los casos de evaluación analizados

(Fuente: Propia)

Según la Figura X. V se observa que, a pesar de realizar los ajustes en el caso 2, estas suposiciones no son suficientes para acercarse a los resultados reales. Como se mencionó, el problema principal es que el equipo de medición se desarrolló para analizar sistemas de refrigeración de uso doméstico y no para equipos complejos donde se debe considerar más supuestos de configuración. Sin embargo, asumiendo un porcentaje de eficiencia entre el 65 y 70 % de los valores obtenidos en el Cooling Cycle Tester, se puede obtener un el valor aproximado del trabajo real.

ANEXO XI

Pruebas preliminares en el Equipo Split del laboratorio de termodinámica

El equipo Split del laboratorio de termodinámica es un equipo nuevo implementado por la ESFOT y con un equipamiento de instrumentos más convencional.



Figura XI. I Equipo Split del laboratorio de termodinámica
(Fuente: Propia)

El equipo cuenta con los siguientes componentes:

- Compresor



Figura XI. II Compresor con aislamiento térmico
(Fuente: Propia)

- Condensador



Figura XI. III Condensador del Split
(Fuente: Propia)

- Válvula de expansión



Figura XI. IV Válvula de expansión
(Fuente: Propia)

- Evaporador



Figura XI. V Aire acondicionado
(Fuente: Propia)

El equipo cuenta con los siguientes instrumentos:

- Manómetros y sensores digitales



Figura XI. VI Manómetro de presión y sensor digital
(Fuente: Propia)

- Sistema de control de temperaturas y sensor digital



Figura XI. VII Sistema de control de temperaturas
(Fuente: Propia)

La evaluación del sistema consiste en dos casos. El primer caso es evaluar el equipo ubicando las pinzas con los termopares en los lugares definidos para cada componente del sistema sin realizar ningún ajuste. Para el segundo caso, se ajusta las condiciones de recalentamiento para acercar los resultados a la temperatura en el evaporador del equipo.

Las condiciones para evaluar el sistema son las siguientes:

- Temperatura ambiente: 17 °C
- Tiempo de estabilización de temperaturas: 15 minutos
- Tiempo de evaluación del sistema: 5 minutos
- Temperatura en el Aire acondicionado: 16 °C
- Tipo de refrigerante: R290

El esquema de la Figura XI. VIII muestra un esquema del posicionamiento de la instrumentación que posee el equipo Split. Además, en el diagrama se encuentran la ubicación de los termopares para realizar la evaluación del sistema.

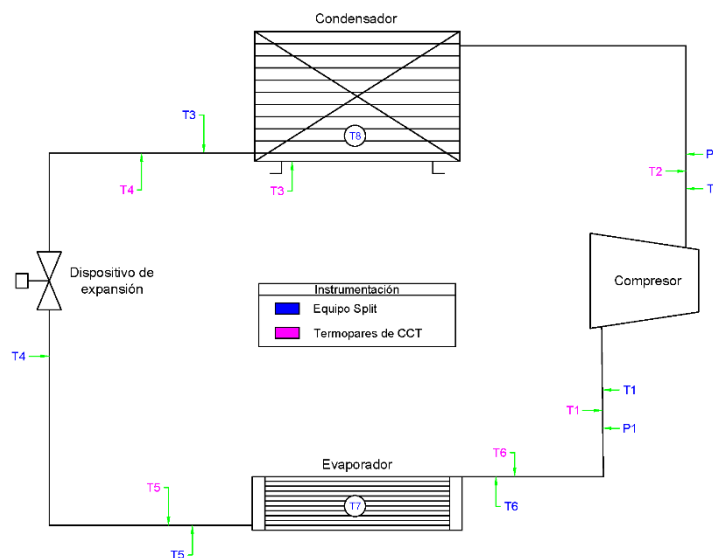


Figura XI. VIII Esquema de instrumentación del equipo y ubicación de los termopares de Cooling Cycle Tester
(Fuente: Propia)

Evaluación del equipo sin ajustes de temperatura en Cooling Cycle Tester

Para obtener los datos de temperatura, se utiliza el programa Cooling Cycle Tester y cada 30 segundos se capturan los datos de temperatura en un periodo de cinco minutos. Las temperaturas obtenidas se tabulan en la Tabla XI. I.

Tabla XI. I Registro de temperaturas mediante uso de Cooling Cycle Tester

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	284,22	307,39	300,96	296,70	278,25	280,50
60	282,49	306,13	300,96	296,45	278,50	280,50
90	283,23	306,64	300,47	296,45	278,75	280,50
120	283,48	306,38	301,21	296,70	278,75	280,75
150	282,98	306,64	300,72	296,70	278,50	280,75
180	283,73	307,14	300,47	296,21	278,25	280,75
210	283,98	307,39	300,47	296,45	278,25	279,75
240	284,22	307,14	300,72	296,45	278,50	279,75
270	283,73	307,14	301,21	296,70	278,75	279,50
300	284,22	307,64	300,72	296,70	278,50	279,50
Promedio	283,63	306,96	300,79	296,55	278,50	280,23

(Fuente: Propia)

Las temperaturas registradas se promedian para tener un valor referencial de temperatura y con este valor calcular las propiedades del refrigerante. Para calcular las propiedades se utiliza la biblioteca Coolprop configurado en el Excel.

Tabla XI. II Tabla de propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema

Propiedad	Estados					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	283,6	307,0	300,8	296,6	278,5	280,2
Presión [Pa]	585487,5	1017663,7	1017663,7	1017663,7	585487,5	585487,5
Entalpía [J/kg]	588706,0	615941,4	272323,3	260777,5	260777,5	582560,4
Entropía [J/kg.K]	2387,0	2390,3	1248,3	1209,7	1216,9	2365,2
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Con todas las propiedades definidas, se procede a calcular el calor de entrada y salida, el trabajo realizado por el compresor y el COP del sistema.

Tabla XI. III Resultados del ciclo evaluado con Cooling Cycle Tester

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	321782,9	[J/kg]
Calor de salida	355163,9	[J/kg]
Trabajo	39219,7	[J/kg]
COP	8,20	[--]

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Evaluación del equipo con ajustes de temperatura en Cooling Cycle Tester

Revisando la configuración del equipo, el subenfriamiento no es necesario en este sistema, debido a que no es un sistema complejo y la mayor parte de las tuberías se encuentran aisladas del ambiente. Sin embargo, la temperatura de recalentamiento es necesaria ajustarla, puesto que, no se tiene acceso al evaporador (aire acondicionado) y al medir en la salida del componente, el valor de temperatura tiene un cierto grado de recalentamiento que desvía los resultados.



Figura XI. IX Presión registrada en el manómetro de baja
(Fuente: Propia)

La temperatura de recalentamiento se ajusta con respecto a la presión alcanzada en el manómetro de baja y su temperatura asociada al punto como gas saturado. Cabe recordar que, a la presión señalada por el manómetro, hay que sumarle la presión barométrica a la altura de Quito y trabajar con las presiones absolutas. Además, la presión se transforma a kilopascales para un mejor manejo de unidades.

$$P_{evap} = (P_{man} + P_{bar}) [psi] * 6.89476$$

$$P_{evap} = (62 + 10.44) [psi] * 6.89476$$

$$P_{evap} = 499.45 [kPa]$$

Con la presión absoluta se determina la temperatura a la cual el refrigerante sale del evaporador como gas saturado usando el programa Coolprop en Excel.

Tabla XI. IV Temperatura de saturación del refrigerante según la presión de baja.

	Propiedad		
	Presión [Pa]	Calidad (x)	T. evaporador [K]
Valor	499456,41	1,00	274,84

(Fuente: Propia)

Con la temperatura en el evaporador determinada según la presión de baja, se configura la temperatura de recalentamiento hasta que la temperatura del estado ideal 5 (T5h) sea similar a la temperatura en el evaporador según la Tabla XI. IV.

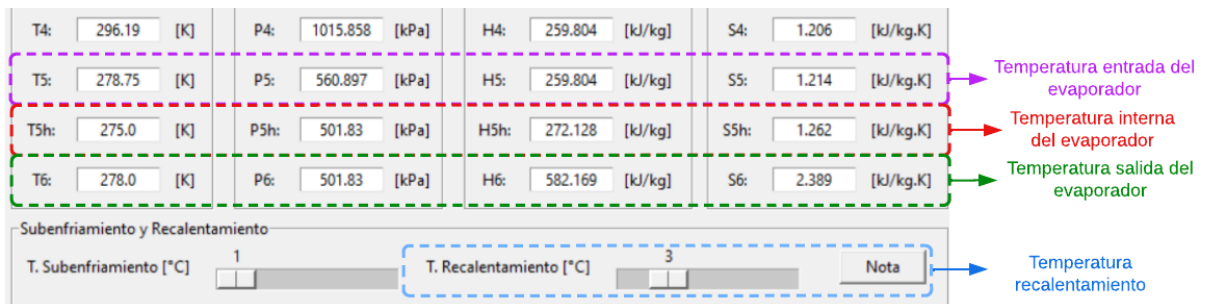


Figura XI. X Cooling Cycle Tester con ajuste en la temperatura de recalentamiento

(Fuente: Propia)

Con los ajustes realizados, se inicia la evaluación del equipo registrando los datos de temperatura cada 30 segundos en un periodo de cinco minutos. En este caso la temperatura de recalentamiento; para estar similar a la del evaporador, es de 3 °C

Tabla XI. V Temperaturas registradas usando Cooling Cycle Tester

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	282,98	307,14	301,46	295,96	278,50	278,75
60	282,98	307,14	300,96	295,96	278,50	278,75
90	283,73	307,89	301,46	296,21	278,25	278,50
120	283,98	307,64	301,21	296,45	278,25	278,50
150	283,48	307,64	301,21	296,70	278,25	278,50
180	283,98	307,64	300,96	296,45	278,25	278,50
210	283,98	307,64	300,96	296,21	278,25	278,50
240	283,48	307,89	300,96	296,45	278,25	278,50
270	283,73	307,39	300,72	296,45	278,25	278,50
300	283,98	307,89	301,21	296,70	278,50	278,75
Promedio	283,63	307,59	301,11	296,35	278,33	278,58

(Fuente: Propia)

El valor promedio de cada temperatura es el valor referencial para calcular las propiedades del refrigerante en los diferentes estados del sistema.

Tabla XI. VI propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	283,6	307,6	301,1	296,4	278,3	278,6
Presión [Pa]	495440,6	1025829,8	1025829,8	1025829,8	495440,6	495440,6
Entalpía [J/kg]	592337,2	616892,7	273202,9	260246,7	260246,7	580786,2
Entropía [J/kg.K]	2427,8	2392,1	1251,2	1207,8	1219,3	2366,8
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Al tener las propiedades definidas del refrigerante, se procede a calcular el calor de entrada y salida, el trabajo realizado por el compresor y el COP del sistema.

Tabla XI. VII Resultados del ciclo evaluado con Cooling Cycle Tester

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	320539,5	[J/kg]
Calor de salida	356646,0	[J/kg]
Trabajo	41380,0	[J/kg]
COP	7,75	[--]

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Evaluación del equipo según la instrumentación del equipo

Para registrar las temperaturas del equipo, primero se identifica cuáles de los ocho puntos de temperatura son adecuados para compararse con las temperaturas registradas por los seis termopares del Cooling Cycle Tester (CCT). Según la Figura XI. VIII del esquema de instrumentos del Split, las temperaturas que no son de interés en el registro son la temperatura T4 y la temperatura T7. Por otra parte, se define las temperaturas T8 y T3 del Split, como T3 y T4 en la Tabla XI. VIII, respectivamente. Esta definición se hace para comparar adecuadamente las temperaturas del CCT con las del Equipo Split. Bajo esta aclaración, se registran las cada 30 segundos durante cinco minutos. Las temperaturas son obtenidas del sistema de control implementado en el Equipo Split.

Tabla XI. VIII Registro de temperaturas según la instrumentación del Split

Tiempo [s]	Temperatura [K]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
30	282,65	314,40	298,15	297,15	274,90	276,90
60	282,40	314,15	298,65	297,40	274,90	276,90
90	281,90	314,65	299,40	298,15	275,70	277,15
120	282,40	314,65	299,15	298,65	275,15	276,65
150	282,40	314,40	299,15	297,90	275,15	276,90
180	282,15	314,90	299,65	298,65	275,15	276,90
210	281,65	314,40	299,90	298,65	275,40	276,40
240	281,90	314,40	300,15	298,90	275,15	277,15
270	281,65	314,90	300,15	298,40	275,65	277,15
300	281,90	314,40	300,15	298,40	274,90	276,90
Promedio	282,10	314,53	299,45	298,23	275,21	276,90

(Fuente: Propia)

Con el promedio de las temperaturas registradas, se calculan las propiedades del refrigerante para cada estado del sistema. El cálculo de las propiedades se realiza con Coolprop en Excel. Para este caso la temperatura y presión son las propiedades intensivas independientes para todos los estados del sistema.

Tabla XI. IX Propiedades del refrigerante para diferentes estados del sistema

Propiedad	Estados					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	282,1	314,5	299,5	298,2	275,2	276,9
Presión [Pa]	499456,4	1119984,8	1119984,8	1119984,8	499456,4	499456,4
Entalpía [J/kg]	589482,2	627496,8	268646,4	265312,6	265312,6	580337,3
Entropía [J/kg.K]	2416,4	2412,5	1235,4	1224,2	1237,5	2383,7

(Fuente: Propia)

Al tener todas las propiedades del refrigerante, se calcula el calor de entrada y salida, el trabajo del compresor y el COP.

Los cálculos asociados a los procesos intervinientes se desarrollan a continuación:

- Calor de entrada:

$$q_{in} = h_6 - h_5$$

$$q_{in} = (580337.3 - 265312.6) \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$q_{in} = 315024.7 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- Calor de salida:

$$q_{out} = h_2 - h_4$$

$$q_{out} = (627496.8 - 265312.6) \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$q_{out} = 362184.2 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- Trabajo del compresor:

$$w_{in} = \frac{n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)}{n - 1}$$

$$w_{in} = \frac{1.125 \cdot 188.5 \cdot (314.5 - 282.1)}{1.125 - 1}$$

$$w_{in} = 54966.6 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

- Coeficiente de desempeño (COP):

$$COP = \frac{q_{in}}{w_{in}} = \frac{315024.7}{54966.6} = 5.73$$

Tabla XI. X Evaluación del sistema usando la propia instrumentación del equipo

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	315024,7	[J/kg]
Calor de salida	362184,2	[J/kg]
Trabajo	54966,6	[J/kg]
COP	5,73	[--]

(Fuente: Propia)

Nota: La diferencia del calor entre el calor entrada y salida, no es aplicable para determinar el trabajo de entrada. Se detalla esto puesto que, previo a la entrada del compresor, existe una ganancia de calor por el ambiente y este no es considerado para el calor de entrada en el evaporador.

Error porcentual en el registro de temperaturas para cada caso

Es importante determinar el error porcentual de las temperaturas en el equipo, puesto que estas temperaturas son superficiales y no se encuentran aisladas del ambiente, por ende, los resultados si pueden desviarse de los reales.

Tabla XI. XI Error porcentual en el registro de datos de temperatura

Denominación	Temperatura [K]					
	1	2	3	4	5	6
Referencial	282,10	314,53	299,45	298,23	275,21	276,90
Caso 1: Sin ajuste	283,63	306,96	300,79	296,55	278,50	280,23
Caso 2: Con ajuste	283,63	307,59	301,11	296,35	278,33	278,58
% Error						
Caso 1: Sin ajuste	0,54	2,40	0,45	0,56	1,20	1,20
Caso 2: Con ajuste	0,54	2,20	0,55	0,63	1,13	0,60

(Fuente: Propia)

De los datos tabulados en la Tabla XI. XI el error más grande se encuentra en la temperatura registrada a la salida del compresor (T2). Este error puede deberse a que la geometría de las tuberías no es proporcional en todas sus conexiones. Además, no se descarta que la temperatura ambiente influye a que la temperatura superficial de la tubería del refrigerante.

A pesar de que no se alcanza a medir la temperatura adecuada en el tubo de descarga, se realizan las evaluaciones para los diferentes casos con la finalidad de encontrar un error porcentual de los resultados.

Error porcentual para los procesos en cada caso de evaluación

El error porcentual para los procesos nos permite tener un grado de confiabilidad de equipo y los resultados calculados mediante el Cooling Cycle Tester.

Tabla XI. XII Error porcentual para los diferentes casos realizados

Resultados	Calor de entrada [J/kg]	Calor de salida [J/kg]	Trabajo [J/kg]	COP
Equipo Instrumentado	315024,7	362184,2	54766,4	5,8
Cooling Cycle Tester sin ajuste	321782,9	355163,9	39219,7	8,2
Cooling Cycle Tester con ajuste	320539,5	356646,0	41380,0	7,7
% Error				
Cooling Cycle Tester sin ajuste	2,1	1,9	28,4	42,6
Cooling Cycle Tester con ajuste	1,8	1,5	24,4	34,7

(Fuente: Propia)

De la tabla comparativa (Tabla XI. XII), el calor de entrada y salida no tiene un error considerable en cuanto a diferencia de resultados. Sin embargo, el trabajo realizado por el compresor para los dos casos evaluados, tienen un error entre el 24 y 28 %.

Diagrama T-s comparativo para cada caso de evaluación

El diagrama T-s permite observar gráficamente cuáles de los procesos están más desviados con respecto a los resultados del equipo instrumentado. Basándose en esto, se puede realizar trabajos futuros para que, bajo otros criterios ingenieriles se pueda ajustar la temperatura del condensador cuando no sea factible colocar el termopar en la mitad del condensador o cuando no se alcancen las temperaturas deseadas en los termopares.

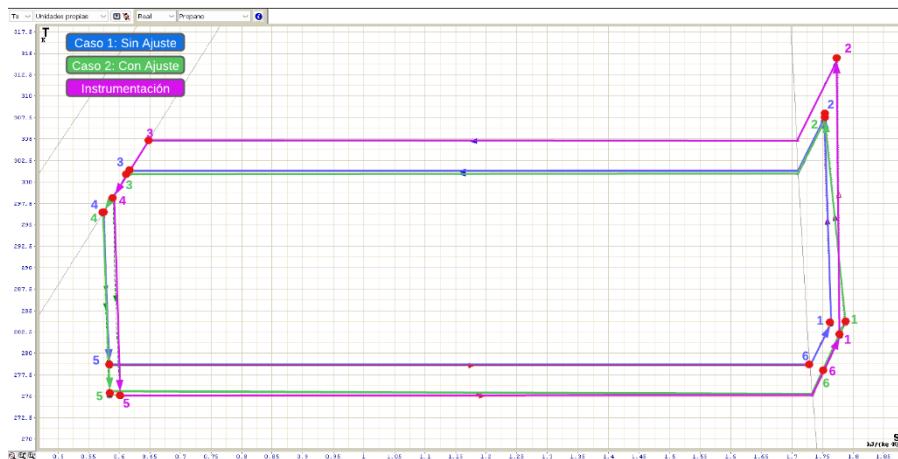


Figura XI. XI Diagrama T-s para los diferentes casos de evaluación

(Fuente: Propia)

Según la Figura XI. XI, cuando en el Cooling Cycle Tester se ajusta la temperatura de recalentamiento hasta la temperatura alcanzada en el evaporador, el diagrama del ciclo real se ajusta al de la instrumentación. Sin embargo, la temperatura de condensación no alcanza la temperatura real produciendo un error en los resultados.

ANEXO XII

Prueba concluyente para los equipos evaluados

En base con los resultados obtenidos en las pruebas preliminares para los equipos evaluados; entre estos el Equipo Chiller, Equipo de refrigeración del laboratorio de termodinámica y el Equipo Split, se obtuvo un error similar en los resultados para todos los casos, variando este entre el 20 y 30 % aproximadamente. El error causal según los diagramas T-s se encuentra en el sistema de alta, correspondiente al proceso de condensación.

El sistema de alta incluye tres estados (estado 2, estado 3 y estado 4) que se han definido en el diagrama T-s de los equipos. De estos tres, usando Cooling Cycle Tester (CCT) los estados 2 y 3 son los que presentan dificultades para alcanzar la temperatura registrada por la propia instrumentación de los equipos. Sin embargo, mediante un cálculo de diferencia de temperaturas, se puede observar en que rango de valores estas temperaturas difieren.

Tabla XII. I Diferencia de temperaturas entre CCT y la instrumentación del equipo

Caso	Temperatura registrada					
	Temperatura 2 (T2) [K]			Temperatura (T3) [K]		
	Instrum.	CCT	Delta Temp.	Instrum.	CCT	Delta Temp.
Equipo Chiller	319,1	313,0	6,1	294,0	294,3	0,3
Equipo de refrigeración	316,2	307,3	8,9	310,2	304,3	5,9
Equipo Split	314,5	307,6	6,9	304,7	301,1	3,6

(Fuente: Propia)

Según la Tabla XII. I, para el estado 2 la temperatura varía de 6 a 9 °C y para el estado 3 la temperatura varía de 0 a 6 °C. Ambos estados tienen un valor cercano a 5°C y este valor es conservativo para todos los casos debido a que mantienen un margen de confiabilidad del equipo. Considerando este análisis y bajo la necesidad de ajustar los resultados preliminares, se decide sumar 5 °C a los estados 2 y 3 del sistema de alta, los cuales son los que más afectan a los resultados del CCT.

Bajo este ajuste en las temperaturas, se procede a calcular nuevamente las propiedades del sistema, configurando en la programación el aumento de este valor de temperatura y evaluar los tres equipos nuevamente observando una mejora en los resultados.

Propiedades termodinámicas para los refrigerantes de equipos

Tabla XII. II Propiedades calculadas para el Equipo Chiller (refrigerante R134a)

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	290,8	317,98	299,26	291,4	259,5	262,5
Presión [Pa]	159256,6	687659,1	687659,1	687659,1	159256,6	159256,6
Entalpía [J/kg]	417167,0	431776,7	236130,2	225040,7	390920,7	389199,8
Entropía [J/kg.K]	1839,8	1777,1	1125,2	1087,6	1744,3	1737,7
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Tabla XII. III Propiedades calculadas para el Equipo de Refrigeración del laboratorio de termodinámica (Refrigerante R134a)

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	280,0	312,3	309,3	294,4	275,4	276,7
Presión [Pa]	331959,7	916002,2	916002,2	916002,2	331959,7	331959,7
Entalpía [J/kg]	403671,7	421000,4	250720,5	229202,7	229202,7	400640,5
Entropía [J/kg.K]	1736,1	1722,9	1172,5	1101,2	1105,6	1725,2
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Tabla XII. IV Propiedades calculadas para el Equipo Split (Refrigerante R290)

Propiedad	Estado					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura [K]	283,6	312,6	306,1	296,4	278,3	278,6
Presión [Pa]	495440,6	1159756,5	1159756,5	1159756,5	495440,6	495440,6
Entalpía [J/kg]	592337,2	621924,5	287092,5	260257,6	260257,6	580786,2
Entropía [J/kg.K]	2427,8	2389,4	1296,0	1206,9	1219,3	2366,8
Calidad			0,0			1,0

(Fuente: Propia)

Evaluación de equipos de refrigeración

Tabla XII. V Resultados de evaluación para el Equipo Chiller

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	164159,14	[J/kg]
Calor de salida	206735,97	[J/kg]
Trabajo	21669,8	[J/kg]
COP	7,58	

(Fuente: Propia)

Tabla XII. VI Resultados de evaluación para el Equipo de Refrigeración del laboratorio de termodinámica

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	171437,8	[J/kg]
Calor de salida	191797,7	[J/kg]
Trabajo	19517,1	[J/kg]
COP	8,78	[--]

(Fuente: Propia)

Tabla XII. VII Resultados de evaluación para el Equipo Split

Resultados del proceso		
Resultado	Valor	Unidad
Calor de entrada	320528,6	[J/kg]
Calor de salida	361666,9	[J/kg]
Trabajo	50114,9	[J/kg]
COP	6,40	[--]

(Fuente: Propia)

Error porcentual de resultados para los ciclos evaluados

Tabla XII. VIII Error porcentual en los resultados obtenidos con CCT en el Equipo Chiller

Resultado	Con ajuste de 5°C en el sistema de alta	Instrument.	%Error
Calor de entrada [J/kg]	164159,14	161927,50	1,38
Calor de salida [J/kg]	206735,97	206019,80	0,35
Trabajo [J/kg]	21669,77	24407,90	11,22
COP	7,58	6,63	14,26

(Fuente: Propia)

Tabla XII. IX Error porcentual en los resultados obtenidos con CCT en el Equipo de Refrigeración

Resultado	Con ajuste de 5°C en el sistema de alta	Instrument.	%Error
Calor de entrada [J/kg]	161395,3	154417,40	4,52
Calor de salida [J/kg]	180016,2	177522,90	1,40
Trabajo [J/kg]	19396,0	24303,80	20,19
COP	8,32	6,40	30,02

(Fuente: Propia)

Tabla XII. X Error porcentual en los resultados obtenidos con CCT en el Equipo Split

Resultado	Con ajuste de 5°C en el sistema de alta	Instrument.	%Error
Calor de entrada [J/kg]	320528,63	315024,70	1,75
Calor de salida [J/kg]	361666,90	362184,20	0,14
Trabajo [J/kg]	50114,89	54766,40	8,49
COP	6,40	5,80	10,27

(Fuente: Propia)

El ajuste de temperatura de 5 °C en los estados 2 y 3, es un valor adecuado para los casos analizados, puesto que es evidente que los resultados finales mejoran notablemente. Sin embargo, queda por mejorar el porcentaje de error de aproximadamente el 10% para la mayoría de los casos, el cual se recomienda realizarlo como complemento de trabajos futuros del presente proyecto.

ANEXO XIII

Manual de usuario para el manejo del instrumento y del software implementado

Manejo del instrumento

El instrumento, al realizarse mediante impresión 3D, tiene filamentos de la impresión delgados, los cuales son lugares donde evidentemente se produciría una fractura en caso de caída del equipo.

Por ende, para proceder a realizar las pruebas, el equipo debe estar ubicado en una superficie fija y amplia, manteniendo la seguridad de este. No se debe ubicar el equipo, donde se produzcan demasiadas vibraciones, considerando que estas pueden desplazar el instrumento.

Pese a que el equipo es manipulable y tiene una geometría estable, no se debe ubicar elementos con demasiado peso (Enciclopedias, libros, pesas, botellas con líquido, etc.) puesto que pueden fracturar al equipo por el peso ejercido.

Para ubicar los termopares, hay que identificar primero los sitios donde estos van a ubicarse para su evaluación. Posteriormente, hay que verificar si el termopar tiene la longitud adecuada entre el equipo y el instrumento. En caso de que los termopares no alcancen la longitud necesaria, cambiar el termopar por una longitud más larga y realizar las conexiones.

En equipos donde se tengan elementos móviles (ventiladores, ruedas, bandas, etc.), revisar que los termopares estén lo más alejado de estos componentes, para no enredar los equipos y producir daños al componente de evaluación o al instrumento que lo evalúa.

En caso de caída, revisar en primera instancia si el componente electrónico (Arduino o Placa PCB) ha sufrido algún daño. Para corroborar este daño, se debe realizar una prueba y verificar si existe transmisión de información entre el instrumento y la computadora. De ser el caso en que se haya dañado uno de estos componentes, reponerlos y seguir los pasos de programación en Arduino o el diseño de la placa PCB, según lo descrito en el presente trabajo. La programación en Arduino y el diseño de la placa en proteus, está adjunto en el comprimido del programa.

Al finalizar las pruebas, limpiar las superficies en las que se usó la pasta térmica, estas son las pinzas y la superficie donde se evaluó. Esto se lo puede realizar, con un estropajo húmedo, o con papel higiénico.

Manejo del software

Detalladamente, la utilización de cada apartado de la interfaz gráfica se detalló en el ANEXO V. Sin embargo, no está por demás recalcar los puntos importantes.

Primeramente, asegúrese que todos los termopares estén perfectamente conectados. En el caso de que uno de los termopares no se encuentre bien conectado, el programa le muestra un “warning” informándole de este problema. De ser el caso en que esto suceda, revisar la conectividad de los termopares manualmente y reiniciar nuevamente el programa.

Con respecto a la conectividad, si el instrumento no se encuentra conectado ningún puerto COM estará disponible y el programa no funcionará. Si se conecta o desconecta el instrumento, aplastar el botón “Refrescar” para actualizar el estado del COM.

Cuando se estén procesando las imágenes, el programa se ralentiza por el hecho de procesar toda la información. Sin embargo, cuando se requiera cambiar alguna propiedad de los apartados con multiopciones, cerrar la ventana del procesamiento de imágenes y realizar el cambio, así obtendrá un mejor desempeño del programa.

Las tres imágenes adjuntas donde se encuentran los componentes son necesarias para el programa, así que no se debe eliminar cualquiera de estas.

Si se requiere obtener la última gráfica de cualquiera de los ciclos evaluados, se puede acceder a la carpeta imágenes creada automáticamente por el programa y copiarla.

ANEXO XIV
Guía práctica

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 1 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

PRÁCTICA 1: Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales.

1. OBJETIVOS

1. Evaluar diferentes ciclos de refrigeración mediante uso de temperaturas superficiales.
2. Calcular el error porcentual entre datos obtenidos por el programa Cooling Cycle Tester y los resultados calculados manualmente.
3. Identificar las razones por la cual los resultados del Cooling Cycle Tester difieren a los calculados manualmente.

2. REVISIÓN TEÓRICA

Para el día de realización de la práctica, se deberá estudiar la información del presente documento y, además, revisar el uso del programa "Cooling Cycle Tester" en el Manual de Usuario. (disponible en: <https://drive.google.com/drive/folders/1L-907-lcdjPA9MLYv6XVTg7pfRueKY3N?usp=sharing>).

Evaluación de sistemas de refrigeración.

La evaluación de sistemas de refrigeración es aplicable en equipos donde se evalúa el comportamiento de nuevos refrigerantes o a su vez la implementación de nuevos componentes mejorados como difusores, intercambiadores de calor, entre otros [1].

La mayor parte de los equipos en los cuales se desarrollan estas evaluaciones son bancos de pruebas, los cuales son totalmente instrumentados. Pero, existe el problema cuando se requiere realizar el monitoreo de estas nuevas tecnologías al implementarse en equipos domésticos como aires acondicionados, refrigeradores, congeladores, etc., donde el equipo no debe ser afectado.

Debido a que es necesario evaluar el desempeño de los ciclos de refrigeración no solo en los casos cuando se implementan nuevas tecnologías, sino también para un control del consumo asociado de electricidad por el uso del compresor, la mejor alternativa es medir temperaturas y mediante tablas de presión –

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 2 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

temperatura, aplicar principios de termodinámica y calcular el estado funcional de los equipos.



Figura XIV. I Equipo Chiller (R-134a) y Enfriadora de leche (R-413A)

(Fuente: [2])

La temperatura superficial tiene la ventaja de no afectar los ciclos de refrigeración para obtener información y esto se debe a que, entre la temperatura superficial y la interna del fluido, existe una caída de temperatura baja. Además, los sensores de temperatura como los termopares, al conectarse de forma abierta, no miden una temperatura puntual. Estos miden una temperatura superficial entre el contacto del alambre y la superficie metálica, generando así un valor más confiable de la temperatura del fluido. Esta técnica de medición es probada con un sensor calibrado Omega SA1XL-K-72, donde el porcentaje de incertidumbre es del 0.31 % [3].

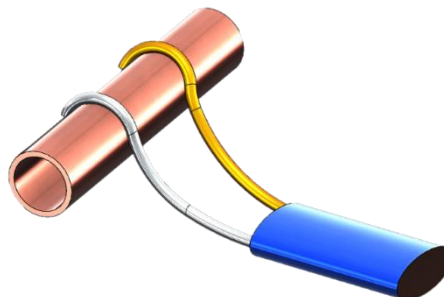


Figura XIV. II Conexión de termopares de forma abierta

(Fuente: Propia)

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 3 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

Ciclo ideal de refrigeración con temperaturas superficiales

Es de conocimiento general que, para definir los estados de un ciclo de refrigeración, se debe conocer dos propiedades intensivas independientes. Si hablamos de usar temperaturas como propiedad principal, para determinar las propiedades de un ciclo ideal, se requieren de dos datos de temperatura. El primer dato se obtiene al registrar la temperatura en la mitad del condensador y el segundo dato al registrar la temperatura en la mitad del evaporador. ¿Por qué es factible ubicar en estos lugares? Al encontrarse cualquier refrigerante en cambio de fase, este proceso se da a presión y temperatura constante según la bibliografía. Gráficamente, se obtiene tres estados que están completamente definidos.

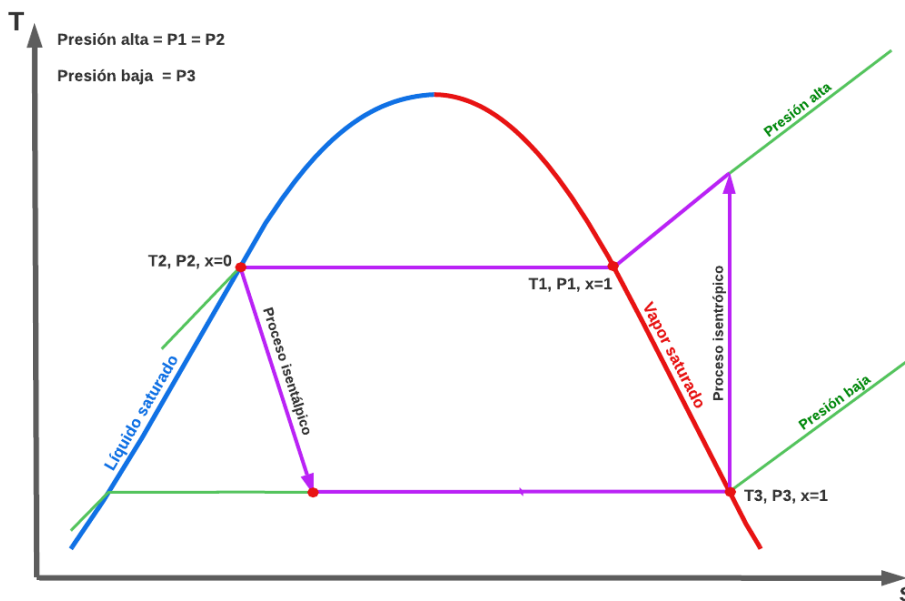


Figura XIV. III Ubicación de estados completamente definidos en el Diagrama T-s

(Fuente: Propia)

Con la temperatura y calidad del refrigerante en las diferentes ubicaciones, queda completamente definido un ciclo ideal. En este caso es más factible considerar al proceso de condensación con calidad cero, puesto que a partir de este punto continúa el proceso isentrópico en el dispositivo de expansión.

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 4 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

Ciclo real de refrigeración con temperaturas superficiales

En un ciclo real de refrigeración, el entorno ambiental o a su vez la misma configuración del equipo, mejoran las condiciones de operación de los sistemas de refrigeración. Por ejemplo, en equipos de laboratorio, la mayor parte de la tubería es aislada del ambiente para que las mediciones no se vean afectadas. Generalmente, este aislamiento se aplica en las tuberías por donde el refrigerante retorna con una temperatura menor a la temperatura ambiente (Salida del evaporador o tubería de absorción). Otra característica en cuenta a la configuración es ubicar los componentes juntos unos con otros, reduciendo las caídas de presión por la tubería.



a)



b)

Figura XIV. IV a) Aislamiento en tuberías con temperaturas menores a la del ambiente; b) Válvula de expansión conectada junto al condensador

(Fuente: Propia)

Al realizar estas configuraciones en un sistema de refrigeración, las condiciones del equipo permiten simplificar efectos producidos por el flujo del refrigerante o por las condiciones ambientales. Un diagrama real del equipo de refrigeración bajo las configuraciones mencionadas previamente se muestra en Figura XIV. V:

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 5 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

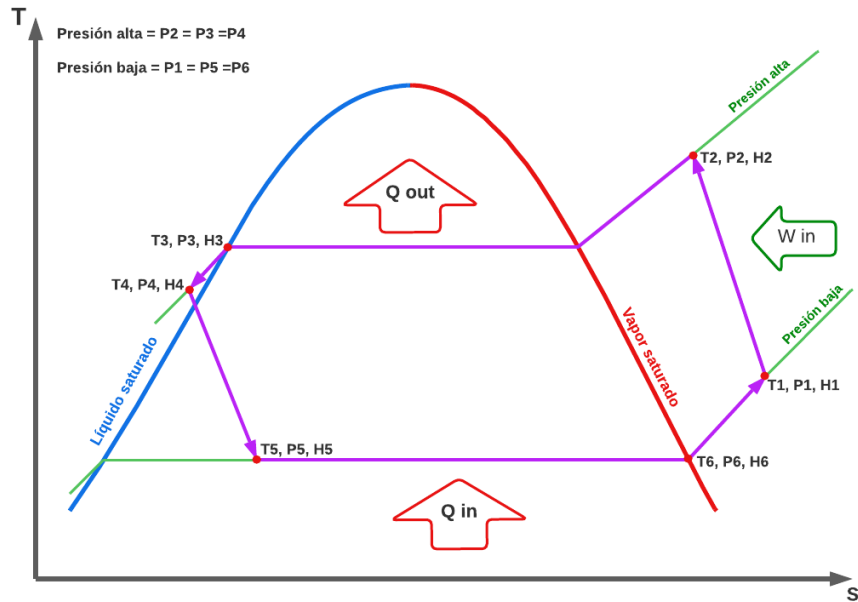


Figura XIV. V Ciclo real de refrigeración

(Fuente: Propia)

Similar al ciclo ideal, en este caso para los estados 3 y 6 se tienen dos propiedades intensivas independientes según se mencionó anteriormente. Por otra parte, al determinar la presión de alta y de baja con los estados 3 y 6, los demás estados quedan definidos con la temperatura superficial registrada en el termopar, completando así un ciclo real de refrigeración. Cabe mencionar que, al ser temperaturas superficiales, influye mucho las condiciones del ambiente.

Ecuaciones asociadas al cálculo de calores de entrada y salida, trabajo del compresor y COP

Para calcular los procesos asociados en el ciclo de refrigeración, se han tomado como referencia las ecuaciones establecidas en el libro de Yunus Cengel [4]. Para el cálculo, hay que considerar que no existe una medición de flujo másico del refrigerante, por ende, las propiedades observadas o calculas son específicas. Para definir las ecuaciones, se toma como referencia el diagrama real presentado en la Figura XIV. V.

- Calor de entrada y salida

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 6 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales <hr/> EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

$$q_{in} = h_6 - h_5 \quad (1)$$

$$q_{out} = h_2 - h_4 \quad (2)$$

Donde:

h_6 : Entalpía en el estado 6 [kJ/kg]

h_5 : Entalpía en el estado 5 [kJ/kg]

h_2 : Entalpía en el estado 2 [kJ/kg]

h_4 : Entalpía en el estado 4 [kJ/kg]

La diferencia entre el calor de entrada y el calor de salida no es aplicable para este equipo. Se aclara este principio, puesto que existen dos ganancias de calor previo a que el refrigerante se comprima, el recalentamiento útil y recalentamiento por absorción. De estos dos, el recalentamiento útil es el que tiene relación directa con el COP.

- Trabajo del compresor

El trabajo del compresor, al ser un sistema real, se lo calcula según un proceso politrópico. No se explica a detalle este tipo de compresión, por lo que se requiere revisar la sección 7.11 del libro de Yunus Cengel para un mejor entendimiento del trabajo a realizarse.

$$w_{in} = \frac{n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)}{n - 1} \quad (3)$$

Donde:

n : Coeficiente politrópico

R : Constante del gas [kJ/kg] – Tabla A-1 [4]

T_2 : Temperatura en el estado 2 [K]

T_1 : Temperatura en el estado 1 [K]

- Coeficiente de desempeño (COP)

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 7 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

$$COP = \frac{q_{in}}{w_{in}} \quad (4)$$

Donde:

q_{in} : Calor de entrada [kJ/kg]

w_{in} : Trabajo de entrada [kJ/kg]

Equipo de adquisición de datos

Para desarrollar la práctica se requiere de dos partes, el software para la adquisición de datos y el equipo. El equipo está conformado por un microcontrolador Arduino, el cual transfiere la información de los termopares al computador. El equipo físico cuenta con 6 termopares para ubicarse en diferentes posiciones del ciclo a evaluar. Cada termopar es identificado por el tipo de conexión en las pinzas:

- Termopares 1 al 4: Configuración abierta del termopar
- Termopares 5 al 6: Configuración cerrada del termopar

Al conectar los termopares mediante el cable USB tipo B, se energiza al equipo para realizar las mediciones mediante uso del software asociado al equipo.

3. MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS

- Materiales:
 - Termopar de diferentes longitudes
 - Cámara fotográfica
 - Tablas termodinámicas para refrigerante R290
- Insumos:
 - Pasta térmica
- Equipos:

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 8 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

- Computador con el software “Cooling Cycle Tester” (disponible en: <https://drive.google.com/drive/folders/1L-907-lcdjPA9MLYv6XVTg7pfRueKY3N?usp=sharing>)
- Equipo de adquisición de datos

4. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

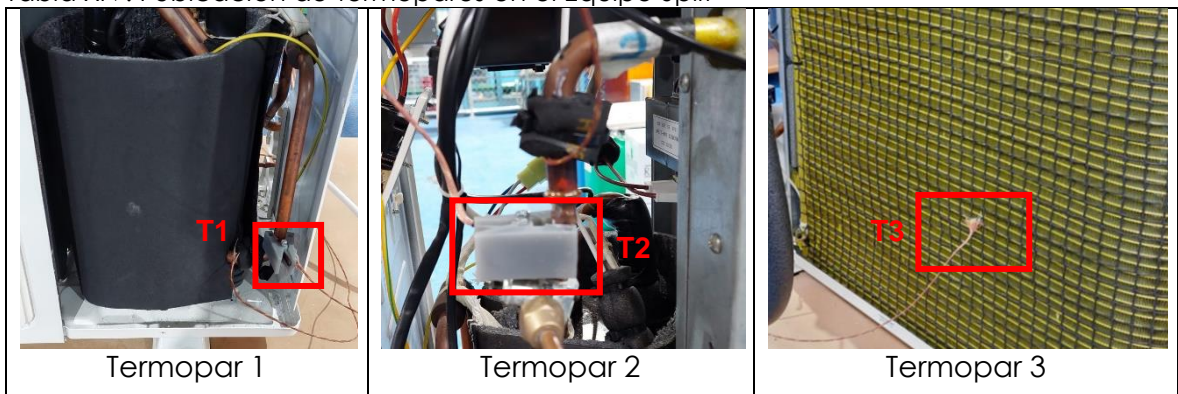
- Identificar el Equipo Split del laboratorio de Termodinámica.
- Conectar el equipo Cooling Cycle Tester (CCT) para desarrollar la toma de datos con el computador.
- Instrumentar el equipo Split con los termopares del CCT.
- Encender el Split y obtener datos del refrigerante en tiempo real.
- Calcular los procesos involucrados del sistema de manera manual.

5. INSTRUCCIONES

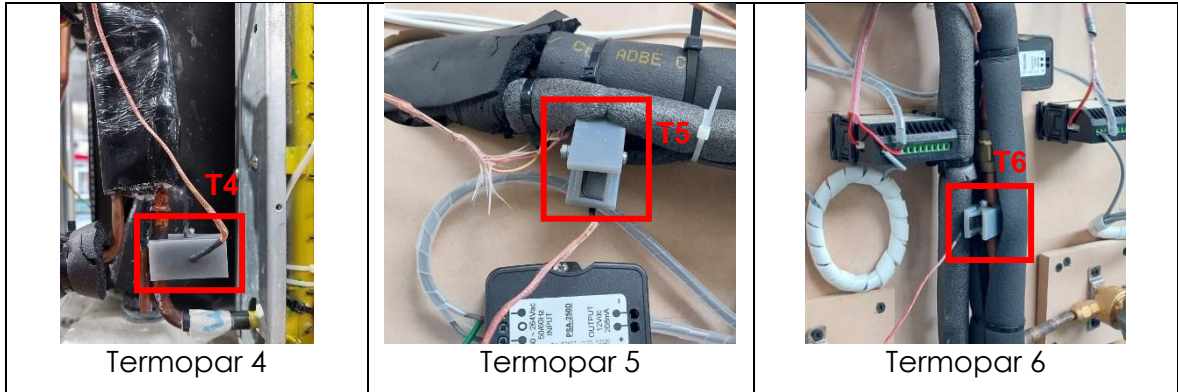
Operaciones previas:

1. Colocar pasta térmica en las pinzas del CCT.
2. Ubicar las pinzas con los termopares en los seis puntos establecidos según la Tabla XIV. II del ciclo de refrigeración.

Tabla XIV. I Ubicación de termopares en el Equipo Split



	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 9 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022



3. Encender el equipo Split y esperar 15 minutos hasta que las temperaturas del sistema se estabilicen.
4. Conectar el equipo CCT con el cable USB al computador.

Proceso de evaluación:

1. Abrir el archivo ejecutable Cooling Cycle Tester (CCT).
2. Seleccionar el puerto COM disponible en el CCT.

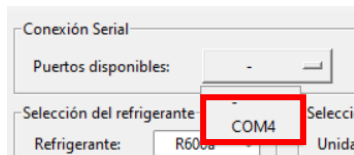


Figura XIV. VI Selección del puerto COM disponible

3. Seleccionar la velocidad de señal disponible en CCT.

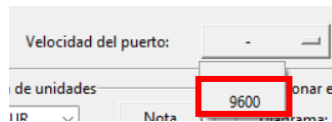


Figura XIV. VII Selección de la velocidad de señal disponible

4. Al cumplir los ítems 2 y 3 se habilita el botón "Conectar".

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 10 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

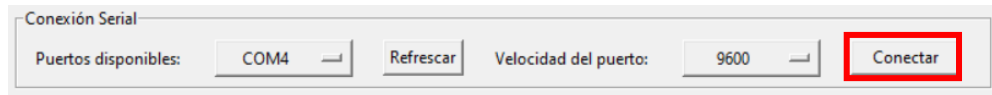


Figura XIV. VIII Botón "Conectar" habilitado

Evaluación sin ajuste:

5. Posterior al presionar el botón "Conectar" el CCT mostrará cuatro propiedades en los diferentes estados del sistema. Estas son:
 - a. Temperatura
 - b. Presión
 - c. Entalpía
 - d. Entropía

Cada propiedad se actualiza continuamente cada tres segundos. Además, se muestran los cálculos de calores de entrada y salida, trabajo del compresor y COP. Estos deben ser capturados en cualquier instante posterior a los 15 minutos de haber estado encendido el Equipo Split.

6. Registrar las propiedades y cálculos realizados en una hoja de Excel identificándolo como "Caso 1: Sin ajuste".

Evaluación con ajuste:

7. Posteriormente de haber cumplido el ítem 6, se realiza la evaluación del sistema con ajuste de temperaturas.
8. El ajuste de temperaturas se realiza con el Slide de temperatura de recalentamiento.

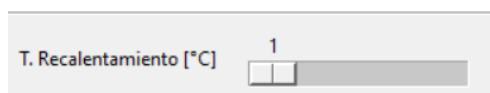


Figura XIV. IX Slide de temperatura de recalentamiento

9. Identificar la presión en el manómetro de baja y transformar a presión absoluta para la ciudad de Quito (10.44 psi)

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 11 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

$$P_{abs}[psi] = P_{man}[psi] + 10.44[psi] \quad (5)$$

10. Transformar la presión absoluta de [psi] a [kPa].

$$P_{abs} [kPa] = P_{abs} [psi] * 6.89476 \quad (6)$$

11. Usando el slide de temperatura de recalentamiento, aumentar la temperatura hasta que la presión en la temperatura isoentálpica del estado 5 (Th5), se ajuste a la presión absoluta calculada en el ítem 10.

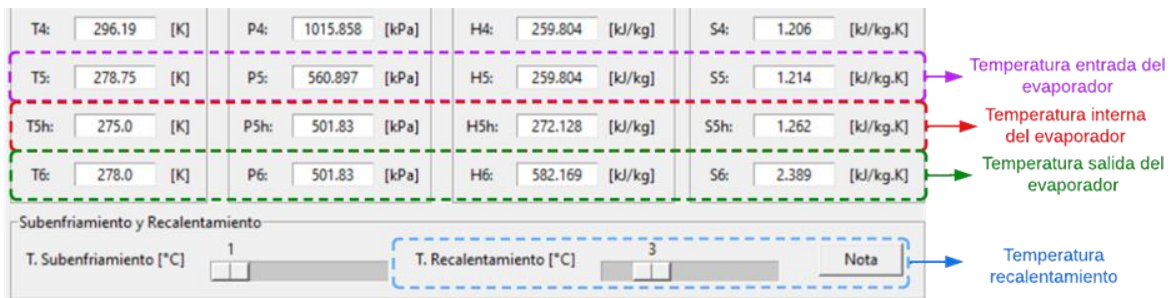


Figura XIV. X Ajuste de temperatura en el slide de recalentamiento

12. Registrar las propiedades y cálculos realizados en una hoja de Excel identificándolo como “Caso 2: Con Ajuste”

13. Cerrar el Programa

Evaluación con instrumentación.

14. Tomar fotos de las temperaturas registradas en el sistema de control del Equipo Split.

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 12 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022



Figura XIV. XI Control de temperaturas Equipo Split

15. Registrar las temperaturas obtenidas.
16. Registrar la presión de los manómetros de alta y de baja del Split.
17. Apagar el Equipo Split.
18. Desconectar los termopares del equipo CCT y limpiar la pasta térmica de las superficies en el equipo Split.
19. Transformar las presiones manométricas a presiones absolutas usando la ecuación del ítem 9.
20. Transformar las presiones de psi a kPa usando la ecuación del ítem 10.
21. Con la temperatura y presión, calcular las propiedades para los seis estados del sistema usando las tablas termodinámicas del refrigerante R290.
22. Calcular los calores de entrada y salida, trabajo y COP.
23. Registrar las propiedades y cálculos realizados en una hoja de Excel identificándolo como "Caso referencial: Instrumentación".
24. Comparar los resultados obtenidos para los casos de evaluación con ajuste y sin ajuste, con respecto al caso referencial de la propia instrumentación.

Tabla XIV. II Ejemplo para comparación de resultados para los casos evaluados

	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA LABORATORIO DE TERMODINÁMICA	Página 13 de 13
		
	Evaluación de sistemas de refrigeración usando temperaturas superficiales EPN-FIM-DIM-LT-GUIA-002	REVISIÓN N° 1
		ÚLTIMA REVISIÓN 20/10/2022

Resultados	Calor de entrada [J/kg]	Calor de salida [J/kg]	Trabajo [J/kg]	COP
Equipo Instrumentado	315024,7	362184,2	54766,4	5,8
Caso 1: Sin ajuste	321782,9	355163,9	39219,7	8,2
Caso 2: Con ajuste	320539,5	356646,0	41380,0	7,7
% Error				
Caso 1: Sin ajuste	2,1	1,9	28,4	42,6
Caso 2: Con ajuste	1,8	1,5	24,4	34,7

25. Desarrollar un análisis de los resultados obtenidos para cada apartado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Aprea, A. Greco y A. Maiorino, «An experimental investigation on the substitution of HFC134a with HFO1234YF in a domestic refrigerator,» *Applied Thermal Engineering ELSEVIER*, pp. 1-9, 2016.
- [2] E. J. Narváez Pilamunga, *Implementación del sistema de monitoreo y supervisión de temperaturas de dos sistemas de refrigeración del laboratorio de tecnología industrial*, Quito, Pichincha: Escuela Politécnica Nacional, 2022.
- [3] H. F. Zúñiga Puebla, *Modelación termodinámica y optimización energética de un ciclo de refrigeración por absorción difusión*, Monterrey: Instituto Tecnológico y de estudios superiores de Monterrey, 2017.
- [4] Y. Cengel, *Termodinámica*, Octava ed., P. Vázquez, Ed., New York: Mc Graw Hill, 2014.

ORDEN DE EMPASTADO