



Recuperación energética, puesta a punto, automatización y adquisición de datos del equipo “Túnel de Aire Multipropósito”, del Laboratorio de Conversión de Energía

Ambato Guasumba, Pablo Xavier y Bravo Rios, Juan Fernando

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Villavicencio Poveda Ángelo Homero

31 de agosto del 2021



Urkund Analysis Result

Analysed Document: RECUPERACION ENERGETICA, PUESTA APUNTO, AUTOMATIZACION Y ADQUISICION DE DATOS DEL EQUIPO TUNEL DE AIRE MULTIPROPOSITO, DEL LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA.pdf (D111322237)

Submitted: 8/16/2021 4:23:00 AM

Submitted By: ahvillavicencio@espe.edu.ec

Significance: 2 %

Sources included in the report:

tesis urkund.pdf (D97025761)

1610855436_805_PROYECTO_-_CAFE.pdf (D92494714)

<https://www.aner.com/blog/mantenimiento-correctivo.html>

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7550/6/UPS-KT00825.pdf>

http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0176_ME.pdf

<http://dspace.espe.edu.ec/bitstream/123456789/4124/1/15T00589.pdf>

<http://ri.ues.edu.sv/19239/1/Dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20equipo%20did%C3%A1ctico%20para%20producci%C3%B3n%20de%20tubos%20de%20hielo.pdf>

<http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/5040/1/Dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20equipo%20did%C3%A1ctico%20para%20desarrollar%20pr%C3%A1cticas%20de%20intercambio%20de%20calor.pdf>

<https://docplayer.es/82894977-Escuela-superior-politecnica-de-chimborazo-facultad-de-mecanica-escuela-de-ingenieria-mecanica.html>

Instances where selected sources appear:

13

Firma:

Ing. Villavicencio Poveda, Ángelo Homero

Director de Tesis

C. C. 1709338931



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Recuperación energética, puesta a punto, automatización y adquisición de datos del equipo Túnel de Aire Multipropósito, del Laboratorio de Conversión de Energía" fue realizado por los señores Ambato Guasumba Pablo Xavier y Bravo Rios Juan Fernando, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 31 de agosto de 2021

Firma:

Ing. Villavicencio Poveda, Ángel Homero

C. C. 1709338931



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Ambato Guasumba Pablo Xavier** y **Bravo Rios Juan Fernando**, con cédulas de ciudadanía n°1723766554 y 1718957481, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Recuperación energética, puesta a punto, automatización y adquisición de datos del equipo Túnel de Aire Multipropósito, del Laboratorio de Conversión de Energía**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 31 de agosto de 2021

Firmas:

.....
Ambato Guasumba, Pablo Xavier

C. C.: 1723766554

.....
Bravo Rios, Juan Fernando

C. C.: 1718957481



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Ambato Guasumba Pablo Xavier** y **Bravo Rios Juan Fernando**, con cédulas de ciudadanía n°1723766554 y 1718957481, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Recuperación energética, puesta a punto, automatización y adquisición de datos del equipo Túnel de Aire Multipropósito, del Laboratorio de Conversión de Energía**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 31 de agosto de 2021

Firmas:

Ambato Guasumba, Pablo Xavier

C. C.: 1723766554

Bravo Rios, Juan Fernando

C. C.: 1718957481

Dedicatoria

A Dios por darme la vida y bendecirme para lograr alcanzar mis metas.

A mis padres, hermanos y familia por apoyarme incondicionalmente.

A mis abuelitos Dolores y Arturo por ser mi motivación para superarme día a día.

Ambato Guasumba, Pablo Xavier

Dedico este trabajo de titulación especialmente a mis padres y hermana, ya que sin su apoyo incondicional y paciencia no habría sido posible este logro y a toda mi familia que durante este tiempo siempre han estado atentos y dispuestos a ayudarme en todo lo que este a su alcance.

Bravo Rios, Juan Fernando

Agradecimiento

A mis padres por haber estado día y noche apoyándome en mi formación académica, a mi hermana por apoyarme en mi momento más difícil, a mi familia que sepan que son parte de este logro, a mis abuelitos por su cariño y enseñanzas.

Ambato Guasumba, Pablo Xavier

Agradezco principalmente a mis padres y hermana, que me han acompañado en este proceso de formación y me han dado su apoyo para lograr cumplir todos mis objetivos.

A mis abuelos por estar siempre para mí, dándome consejos y ayudándome en todo lo que necesite.

Bravo Rios, Juan Fernando

Índice de contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de contenidos	8
Índice de tablas	12
Índice de figuras	15
Resumen	20
Abstract	21
Capítulo I Generalidades	22
Antecedentes	22
Definición del Problema	23
Objetivos	23
General	23
Específico	23
Alcance	23
Justificación del proyecto	24
Capítulo II Marco teórico	26
Descripción General del Equipo	26
Campos de estudio	26
Componentes del equipo TD49	26
Módulos del equipo túnel de aire multipropósito - TD49	27
Tipos de Bancos de Tubos	27

Unidad refrigeración TD44a	29
Transferencia de Calor	29
Convección	29
Números adimensionales.....	30
Diseño Térmico	32
Flujo sobre banco de tubos.....	32
Análisis de Intercambiadores de Calor	38
Ciclo de Refrigeración	40
Ciclo Ideal.....	40
Ciclo de Real.....	41
Mantenimientos.....	42
Mantenimiento correctivo	42
Mantenimiento Preventivo	43
Mantenimiento Modificativo	43
Automatización.....	43
Sensores.....	43
Transmisor	44
Transductor.....	44
Sistemas de Control	44
Tipos de Señales.....	45
Acondicionamiento de Señales	46
Adquisición de Datos.....	46
Software LabView	47

Capítulo III	Recuperación y mantenimiento del equipo	51
	Levantamiento técnico del estado actual del equipo.....	51
	Mantenimiento Correctivo del Módulo Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas.....	52
	Mantenimiento Correctivo del Módulo Intercambiador de Calor de Tubos Lisos.....	58
	Mantenimiento Correctivo del Módulo Evaporador y Unidad de Refrigeración.....	62
	Mantenimiento Correctivo de Secciones Adicionales de Túnel de Aire.....	68
	Resultados del Mantenimiento	71
	Pruebas del funcionamiento del equipo	72
	Condiciones de Prueba.....	72
	Pruebas de fugas	72
	Pruebas de las resistencias eléctricas.....	73
Capítulo IV	Automatización, diseño eléctrico e implementación del sistema de adquisición de datos.	75
	Automatización	75
	Diseño del sistema de adquisición de datos.....	75
	Diseño de Placas	79
	Diseño de la Placa Principal.....	79
	Diseño de la Placa Secundaria	83
	Diseño del sistema de control.....	86
	Relés de control	86
	Conexiones de los relés de control.....	87
	Diagramas de control	90
	Diseño del sistema de fuerza	92

Actuadores de fuerza	92
Diagramas de fuerza	93
Diagramas de las fuentes de alimentación.....	94
Diseño del armario eléctrico	95
Instrumentación.....	98
Sondas de temperatura LM35.....	98
Sensor de presión.....	100
Análisis de los sensores de temperatura LM35.....	102
Capítulo V Diseño del human machine interface (HMI).....	106
Interfaz HMI – Front Panel	106
Pantalla Principal.....	106
Pantalla Secundaria.....	106
Programación HMI – Block Diagram	113
Capítulo VI Recolección y análisis de datos.....	127
Condiciones para las realizar las prácticas	127
Recolección de datos	129
Datos del intercambiador de calor de tubos lisos	130
Datos del intercambiador de calor de tubos con aletas	134
Datos de la unidad de refrigeración	137
Ejemplo de cálculos.....	139
Práctica 1 - IC-TL-SIMPLE-1.....	139
Práctica 3 - IC-TA-SIMPLE-1.....	144
Análisis de resultados.....	149

Capítulo VII	Análisis económico	155
	Costos directos.....	155
	Costos Indirectos.....	158
Capítulo VIII	Conclusiones y recomendaciones.....	161
	Conclusiones	161
	Recomendaciones	162
	Referencias	163

Índice de tablas

Tabla 1	Componentes del equipo TD49	26
Tabla 2	Lista de los módulos disponibles del equipo TD49	27
Tabla 3	Capacidad nominal de la Unidad de Refrigeración – TD44a	29
Tabla 4	Correlaciones del número de Nusselt - Teoría de Zukauskas para un flujo cruzado en banco de tubos con más de 16 filas, $0.7 < Pr < 500$	35
Tabla 5	Factor de corrección F para un $NL < 16$ y $ReD > 1000$	36
Tabla 6	Bloques y Estructuras de LabView	49
Tabla 7	Detalle Levantamiento Técnico del Estado Actual del Túnel de Aire Multipropósito.	51
Tabla 8	Detalle Después del Mantenimiento Correctivo del Túnel de Aire Multipropósito.....	51
Tabla 9	Levantamiento Técnico de Módulo Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas. [Estado Actual]	52
Tabla 10	Módulo Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas. [Después del Mantenimiento Correctivo].	55

Tabla 11 Levantamiento Técnico del Módulo Intercambiador de Calor de Tubos Lisos. [Estado Actual].....	58
Tabla 12 Módulo Intercambiador de Calor de Tubos Lisos. [Después del Mantenimiento Correctivo].	60
Tabla 13 Levantamiento Técnico del Módulo Evaporador y Unidad de Refrigeración. [Estado Actual].....	62
Tabla 14 Módulo Evaporador y Unidad de Refrigeración. [Después del Mantenimiento Correctivo].	65
Tabla 15 Secciones Adicionales del Túnel de Aire. [Estado Actual].....	68
Tabla 16 Secciones Adicionales del Túnel de Aire. [Después del Manteamiento Correctivo].	70
Tabla 17 Datos de voltaje y corriente medidos en las resistencias	74
Tabla 18 Matriz de decisión de la tarjeta de adquisición de datos	76
Tabla 19 Características Técnicas del Arduino Mega2560	77
Tabla 20 Detalle de Conexiones Arduino a Jack DC	81
Tabla 21 Detalle de Conexiones Arduino a Conector Flat Hembra	82
Tabla 22 Detalle de Conexiones Arduino a Conector Arduino hembra	82
Tabla 23 Detalle de Conexiones Arduino a Conector Arduino Macho 6 pines	83
Tabla 24 Detalle de Conexiones Arduino a Conector Arduino Macho 3 pines	83
Tabla 25 Detalle de Conexiones de Molex	84
Tabla 26 Detalle de Conexiones entre Conector Flat Hembra y Molex.....	85
Tabla 27 Identificación de los relés de control.....	89
Tabla 28 Identificación de los actuadores de fuerza	93
Tabla 29 Listado de componentes del armario eléctrico	97

Tabla 30 Características técnicas de la sonda LM35 tipo sumergible	99
Tabla 31 Valores de presión a la entrada del ducto en función de la velocidad del aire.....	101
Tabla 32 Análisis estadístico descriptivo de los sensores de temperatura LM35, PRINCIPALES	102
Tabla 33 Análisis estadístico descriptivo de los sensores de temperatura LM35, SECUNDARIAS	103
Tabla 34 Análisis estadístico de temperaturas tomadas con los sensores LM35	103
Tabla 35 Tabla de distribución de frecuencias	104
Tabla 36 Condiciones iniciales para las pruebas realizadas.....	127
Tabla 37 Listado de las prácticas a realizar en el túnel de aire multipropósito.....	128
Tabla 38 Nomenclatura usada en la recolección de datos	130
Tabla 39 Datos del tomados para la Práctica 1- IC-TL-SIMPLE-1	130
Tabla 40 Datos del tomados para la Práctica 2- IC-TL-TRIPLE-1	132
Tabla 41 Datos del tomados para la Práctica 3- IC-TA-SIMPLE-1	134
Tabla 42 Datos del tomados para la Práctica 4- IC-TA-TRIPLE-1.....	135
Tabla 43 Datos del tomados para la Práctica 5-REFRIGERACIÓN-1.....	137
Tabla 44 Datos del tomados para la Práctica 6-REFRIGERACION-2.....	138
Tabla 45 Resultado de la recolección de datos para el intercambiador de calor de tubos lisos y aletas	149
Tabla 46 Resultados obtenidos para el Módulo Intercambiador de Calor de Tubos Lisos	150
Tabla 47 Resultados obtenidos para el Módulo Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas	150
Tabla 48 Resultados obtenidos para el Evaporador y Unidad de Refrigeración.....	151
Tabla 49 Resumen de análisis de errores encontrados en el intercambiador de tubos lisos	152

Tabla 50 Resumen de análisis de errores encontrados en el intercambiador de tubos con aletas.	152
Tabla 51 Honorarios para profesionales de la Universidad.....	155
Tabla 52 Remuneración a No Profesionales	156
Tabla 53 Remuneración a estudiantes.....	156
Tabla 54 Costo de la instrumentación utilizada	156
Tabla 55 Costo de Materiales y Equipos	157
Tabla 56 Costo Indirectos de Fabricación	159
Tabla 57 Total Costos Directos.....	159
Tabla 58 Total Costos Indirectos.....	159
Tabla 59 Costo total.....	160

Índice de figuras

Figura 1 Curvas de rendimiento de los bancos de tubos en simple y triple paso.....	28
Figura 2 Configuración de tubos en bancos escalonados o alineados	33
Figura 3 <i>Diagrama del factor de corrección F_1</i>	39
Figura 4 Ciclo ideal de refrigeración.....	40
Figura 5 Ciclo Real de refrigeración.....	41
Figura 6 Diagrama de un Sistema de Control	45
Figura 7 Señal Tipo: Digital.....	45
Figura 8 Señal Tipo: Analógica	46
Figura 9 Sistema de Adquisición de Datos	47
Figura 10 Túnel de aire multipropósito, ensamblado después del mantenimiento correctivo ...	71

Figura 11	Prueba de fugas al intercambiador de calor de tubos con aletas	73
Figura 12	Prueba de fugas al intercambiador de calor de tubos lisos	73
Figura 13	Placa Arduino Mega2560, instalada en el armario eléctrico	77
Figura 14	Fuente de alimentación AC/DC para el Arduino Mega2560.....	78
Figura 15	Diseño de la placa en Proteus Profesional 8.8.....	80
Figura 16	Layout de la placa Principal (P2).....	81
Figura 17	Esquema en Proteus Profesional 8.8 de la placa secundaria (P1)	84
Figura 18	Layout de la placa secundaria	85
Figura 19	Módulos de relés de control TONGLING	87
Figura 20	Pines de conexión del relé independiente	87
Figura 21	Pines de conexión del módulo de 4 relés	88
Figura 22	Diagrama de conexión de fuerza para los relés de control	90
Figura 23	Circuito de control de los relés TONGLING.....	91
Figura 24	Circuito de control de los actuadores de fuerza EBASEE	92
Figura 25	Disposición de los contactores en el tablero eléctrico con su codificación	93
Figura 26	Diagrama de fuerza	94
Figura 27	Fuente de alimentación PW1 Tecquipment 220 V AC / 60 Hz /2PH	95
Figura 28	Armario eléctrico 40x30x15 mm	96
Figura 29	Diseño del armario eléctrico en AutoCAD Electrical 2020	96
Figura 30	Diseño del armario eléctrico final	97
Figura 31	Sonda de Temperatura LM35.....	98
Figura 32	Ingreso de la característica estática del sensor LM35 en el diagrama de bloque en LabView	99

Figura 33 Acondicionamiento de señal sensor de temperatura LM35.....	100
Figura 34 Ingreso de la característica estática del sensor MPX5010 en el diagrama de bloque en LabView	101
Figura 35 Distribución de frecuencias	104
Figura 36 Gráfica de control X-barra	105
Figura 37 Menú principal del HMI.....	106
Figura 38 Botones usados en el HMI para el intercambiador de tubos lisos.....	107
Figura 39 Botones usados en el HMI para la unidad de refrigeración.....	107
Figura 40 Sección para la toma de datos del agua	109
Figura 41 Sección para la toma de datos del aire.....	109
Figura 42 Sección para el encendido de las resistencias eléctricas	110
Figura 43 Sección para la toma de datos de presión.....	110
Figura 44 Sección para la toma de datos programadas	111
Figura 45 Sección para la toma de temperaturas adicionales.....	111
Figura 46 Sección para el encendido y apagado del compresor de la unidad de refrigeración.	112
Figura 47 Sección para la toma de temperaturas de la unidad de refrigeración.....	112
Figura 48 Sección para el tiempo actual	112
Figura 49 Archivo del proyecto del HMI.....	113
Figura 50 Diagrama de bloques con el código del MENU.vi.....	114
Figura 51 Evento “Panel Close” de la Event Structure	115
Figura 52 Evento “Stop Value Change”	116
Figura 53 Diagrama de bloques para sensores analógicos.....	118
Figura 54 Diagrama de bloques para los sensores digitales.....	119

Figura 55 Ingreso de la característica estática de los sensores de temperatura LM35	120
Figura 56 Ingreso de la característica estática del sensor de presión	121
Figura 57 Conexión entre el bloque Set Dynamic Data Attributes al bloque Merge Signals	122
Figura 58 Diagrama de bloques con el código SALTO.vi.....	123
Figura 59 Referencia al Front Panel	124
Figura 60 Editor de íconos	124
Figura 61 Activación del compresor desde el Block Diagram.....	125
Figura 62 Eliminación de señales analógicas.....	126
Figura 63 Distribución de tubos escalonados para el intercambiador de calor de tubos lisos, tubos con aletas y el evaporador	128
Figura 64 Puntos para la toma de datos en los intercambiadores de calor	129
Figura 65 Puntos para la toma de datos en el túnel de aire multipropósito	129
Figura 66 Tendencia de las temperaturas del aire en la Práctica 1-IC-TL-SIMPLE-1	131
Figura 67 Tendencia de las temperaturas del agua en la Práctica 1-IC-TL-SIMPLE-1	132
Figura 68 Tendencia de las temperaturas del aire en la Práctica 2-IC-TL-TRIPLE-1	133
Figura 69 Tendencia de las temperaturas del agua en la Práctica 2-IC-TL-TRIPLE-1	133
Figura 70 <i>Tendencia de las temperaturas del aire en la Práctica 3-IC-TA-SIMPLE-1</i>	134
Figura 71 <i>Tendencia de las temperaturas del agua en la Práctica 3-IC-TA-SIMPLE-1</i>	135
Figura 72 Tendencia de las temperaturas del aire en la Práctica 4-IC-TA-TRIPLE-1	136
Figura 73 Tendencia de las temperaturas del agua en la Práctica 4-IC-TA-SIMPLE-1.....	136
Figura 74 Tendencia de las temperaturas del aire de la Práctica 5-REFRIGERACIÓN-1.....	137
Figura 75 Tendencia de las temperaturas para la Práctica 6-REFRIGERACION-2	138
Figura 76 Intercambio de calor por el aire en Tubos lisos vs Tubos con aletas a 1500W	153

Figura 77 Intercambio de calor por el aire en Tubos lisos vs Tubos con aletas a 1500W 153

Resumen

El túnel de aire multipropósito es un equipo con más de 40 años de antigüedad que se encuentra en el Laboratorio de Conversión de energía, mismo que no estaba funcional ya que sus componentes principales y secundarios se encontraban en mal estado, además no contaba con un sistema automatizado para la adquisición de datos. En el presente trabajo se realiza una investigación bibliográfica sobre el equipo, para proporcionar información acerca de su funcionamiento, sus módulos y sus aplicaciones a nivel educativo.

Además, se realizará un levantamiento técnico actual del equipo y se planteará una serie de actividades de mantenimiento correctivo para los módulos de: intercambiador de calor de tubos lisos, intercambiador de tubos con aletas, resistencias, ducto de entrada y salida, ventiladores y unidad de refrigeración; una vez realizadas estas actividades se plantea un plan de mantenimiento preventivo para alargar la vida útil del equipo.

Una vez recuperado y puesto a punto el equipo se diseñará un HMI (Human Machine Interface) en LabView y con un Arduino Mega2560 como microcontrolador de datos para la lectura de las temperaturas y presión, este programa se lo cargará en una computadora del Laboratorio de Conversión de Energía y estará a disposición de los estudiantes para realizar las prácticas.

Palabras claves

- **MANTENIMIENTO**
- **INTERCAMBIADORES DE CALOR AIRE-AGUA**
- **ADQUISICION DE DATOS**
- **AUTOMATIZACION**
- **INTERFAZ**

Abstact

The multipurpose air tunnel is an equipment with more than 40 years old that is in the Energy Conversion Laboratory, which was not functional since its main and secondary components were in poor condition, and it also did not have a system automated for data acquisition. In the present work, a bibliographic research of the equipment is carried out, to provide information about its operation, its modules, and its applications at an educational level.

In addition, a current technical survey of the equipment will be carried out and a series of corrective maintenance activities will be proposed for the modules of plain tube heat exchanger, finned tube heat exchanger, heating elements, inlet and outlet duct, fans and refrigeration unit. Once these activities have been carried out, a preventive maintenance plan will be proposed to extend the useful life of the equipment.

Once the equipment has been recovered and tuned, an HMI (Human Machine Interface) will be designed in LabView and with an Arduino Mega2560 as a data microcontroller to measure temperatures and pressure, this program will be loaded into a computer in the Energy Conversion Laboratory and will be available to students to carry out the practices.

Keywords

- **MAINTENANCE**
- **AIR-WATER HEAT EXCHANGERS**
- **DATA ADQUISITION**
- **AUTOMATION**
- **INTERFACE**

Capítulo I Generalidades

Antecedentes

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, en el Laboratorio de Conversión de Energía se encuentra el equipo de código LT 24-E de nombre Túnel de Aire Multipropósito, adquirido en la década de los 80's. Actualmente en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE dicho equipo está en operación y es utilizado para elaborar prácticas de laboratorio de evaluación de la primera ley de la termodinámica, aire acondicionado y ventilación, refrigeración y convección forzada; sin embargo, el equipo presenta fallas de funcionamiento que impiden una adecuada realización de las prácticas.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en el año 2008 se realizó el diseño y construcción de un módulo de enfriamiento evaporativo por celdas húmedas para el túnel multipropósito del laboratorio de Conversión de Energía, permitiendo al laboratorio ampliar la gama de equipos disponibles y a su vez proveer a los estudiantes de la carrera nuevos temas de investigación y desarrollo (García Mongue & Maldonado Vasconez, 2008).

Además, en la Universidad Politécnica Salesiana se implementó un banco de pruebas tipo túnel de viento para la selección de ventiladores de refrigeradores domésticos con el fin de obtener las curvas características de los ventiladores de los refrigeradores de marca INDURA (Calderón Neira, 2018) .

También en la Universidad de las Américas se llevó a cabo el diseño de un túnel de aire con el fin de realizar experimentos relacionados al aire acondicionado de uso industrial y doméstico (Córdor Vaca, 2008).

Definición del Problema

En el Laboratorio de Conversión de Energía perteneciente a la Carrera de Ingeniería Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, opera el equipo Túnel de Aire Multipropósito adquirido hace más de 40 años.

Durante este tiempo el equipo ha mostrado desgaste en sus componentes tanto principales como secundarios, por lo que no se encuentra operando en óptimas condiciones y no posee un sistema automatizado de adquisición de datos, lo cual resulta en un proceso de instrucción pedagógica ineficiente al dificultarse el desarrollo de las prácticas de laboratorio.

Objetivos

General

Realizar la Recuperación Energética, Puesta A Punto, Automatización y Adquisición de Datos del equipo “Túnel de Aire Multipropósito”, del Laboratorio de Conversión de Energía.

Específico

- Desarrollar la investigación bibliográfica sobre el equipo.
- Realizar el levantamiento técnico del estado actual del equipo.
- Diseñar la solución mecánico-energética para la recuperación del equipo.
- Diseñar un Human-Machine Interface (HMI) para la adquisición de datos del equipo.

Alcance

En el presente trabajo se realizará una investigación bibliográfica sobre el equipo “Túnel de Aire Multipropósito” proporcionando información acerca de su funcionamiento, sus módulos y sus aplicaciones tanto a nivel de formación estudiantes como de investigación profesional. Además, se realizará el levantamiento técnico del estado actual del equipo para determinar que procedimientos de corrección se le deben implementar para su correcto funcionamiento.

Una vez hecho el análisis de la condición del equipo se procederá a diseñar la solución mecánico-energética para la recuperación del Túnel de Aire Multipropósito, la cual incluirá actividades de mantenimiento correctivo, plan de mantenimiento preventivo y mantenimiento modificativo de ser el caso.

Además, se implementará todo el sistema de adquisición de datos para las nuevas prácticas y un HMI intuitivo para los estudiantes del laboratorio de Conversión de Energía en todas las prácticas a realizarse y se entregará hojas de resultados de las pruebas realizadas a cada práctica, un manual de usuario de la interfaz HMI y un plan de mantenimiento preventivo.

Justificación del proyecto

El egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, posee las competencias suficientes y necesarias para dar solución a la problemática que actualmente presenta el Túnel de Aire Multipropósito, el cual ha servido a varias generaciones por un espacio de tiempo mayor a cuarenta años lo que ha generado que el equipo en cuestión haya sufrido un desgaste y deterioro tanto en sus componentes principales como en sus componentes secundarios, impidiendo una correcta ejecución de las prácticas y por ende afectando la formación técnica del estudiante, de aquí surge la necesidad urgente de intervenirlo y realizar la recuperación mecánico - energética, dándole un mantenimiento correctivo e implementando la instrumentación necesaria para obtener datos confiables en cada experimento que se realice.

El perfil de egreso de un ingeniero de la Carrera de Ingeniería Mecánica se establece entre otras competencias, crear y diseñar sistemas mecánicos y energéticos para su aplicación en la industria, aplicando la teoría, normas y cuidado del medio ambiente, bajo este contexto la realización del presente proyecto se justifica plenamente ya que se enmarca en lo señalado y

adicionalmente se prevé la implementación de nuevas prácticas para las cátedras de Diseño Térmico y Transferencia de Calor, aprovechando los módulos que incluye para la transferencia de calor aire-agua en sus diferentes configuraciones. Este proyecto busca otorgar a nuevas generaciones de estudiantes equipos confiables para la obtención de datos en menor tiempo con una alta confiabilidad y para futuros proyectos de investigación. También permite ahorrar recursos a la universidad en la adquisición de nuevos equipos.

Capítulo II Marco teórico

Descripción General del Equipo

El túnel de aire multipropósito consiste en un ducto rectangular que está diseñado y construido en módulos o secciones, unidos por clips herméticamente y sujetadores de acción rápida. Tanto el tubo como su entrada cónica fueron construidos de acuerdo con Estándares Británicos. (TecQuipment)

Campos de estudio

- Aire acondicionado
- Refrigeración
- Transferencia de calor de convección forzada
- Transferencia de masa por secado y humidificación

Componentes del equipo TD49

Tabla 1

Componentes del equipo TD49

Nro.	Componente
1	Ventilador (axial o coaxial)
2a	Conducto de salida 1
2b	Conducto de salida 2
3	Conducto de entrada
4	Sección del conducto para pruebas
5	Sección de entrada de aire
6	Malla alineadora de flujo
7	Estación de medida de temperatura
8	Medición de presión (tubo Pitot)
9	Estación de medida de temperatura

Nro.	Componente
10	Mesa soporte

Nota. Recuperado de TecQuipment. (s.f.). The Multi-Purpose Air Duct and Associated Equipment . Englad .

Módulos del equipo túnel de aire multipropósito - TD49

Tabla 2

Lista de los módulos disponibles del equipo TD49

Módulo	Descripción
TD49a	Elemento de transferencia de calor de tubos lisos de cobre de líquido-aire.
TD49b	Elemento de transferencia de calor de tubos de cobre con aletas de líquido – aire.
TD49c	Elemento de enfriamiento por expansión directa de R134a de líquido-aire.
TD49d	Mallas de resistencia de medición de temperatura.
TD49e	Soporte móvil del equipo.
TD49f	Ventilador (Alternativo axial y coaxial)
TD49g	Elemento eléctrico de recalentamiento de aire.
TD44a	Unidad refrigeración con R134a.

Nota. Recuperado de TecQuipment. (s.f.). The Multi-Purpose Air Duct and Associated Equipment . Englad .

Tipos de Bancos de Tubos

El equipo consta de 3 bancos de tubos:

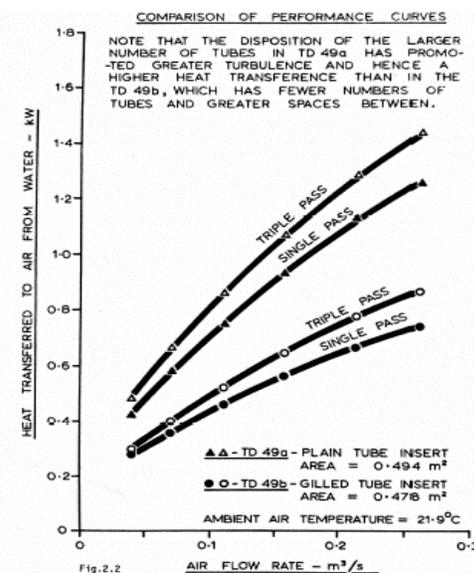
- TD. 49a: Tubos lisos de cobre para intercambio de calor líquido-aire.
 - 33 tubos de cobre, divididos en 3 bancos de 11 tubos.
 - Diámetro exterior: 15.9mm, Espesor: 1.63mm.
 - Longitud del tubo: 300mm
 - Área de intercambio de calor: 0.494m²
- TD.49b: Tubos de cobre con aletas para intercambio de calor líquido-aire.

- 6 tubos de cobre, divididos en 3 filas de 2 tubos.
 - Diámetro exterior: 15.88mm, Espesor: 1.63mm.
 - Diámetro de aletas: 33.5mm
 - Longitud del tubo: 300mm
 - Área de intercambio de calor: 0.478m²
- TD.49c: Elemento de enfriamiento por expansión directa de R134a de líquido-aire.
 - 12 tubos de cobre
 - Aletas de aluminio

El manual del equipo también nos proporciona curvas de rendimiento de los diferentes bancos de tubos que tiene el túnel de aire multipropósito en sus diferentes configuraciones de simple y triple paso, como se puede observar en la **Figura 1**.

Figura 1

Curvas de rendimiento de los bancos de tubos en simple y triple paso



Nota. El gráfico representa el rendimiento de los bancos de tubos, en el eje de las ordenadas se representa el calor transferido al aire del agua en kW y en las abscisas la tasa de flujo del aire en m³/s. Tomado de TecQuipment. (s.f.). The Multi-Purpose Air Duct and Associated Equipment . Englad

Unidad refrigeración TD44a

- Refrigerante R134a
- Compresor semi-hermético
 - 220/240 V, 60Hz
- Conectado al módulo TD49c
- Unidad condensadora de 0.5HP nominal.

La capacidad nominal del módulo TD44a se presenta en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Capacidad nominal de la Unidad de Refrigeración – TD44a

Temperatura de Evaporación °C	Capacidad Nominal kcal/hr
-15	575
-10	725
-5	900
0	1075
5	1250
10	725

Nota. Recuperado de TecQuipment. (s.f.). The Multi-Purpose Air Duct and Associated Equipment . Englad .

Transferencia de Calor**Convección**

La convección es un modo de transferir energía entre una superficie sólida y un líquido o gas que se encuentre adyacente y que este en movimiento. El flujo de calor que ocurre por convección se expresa de la siguiente manera:

$$q = h A_s (T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Donde:

q = Flujo de calor por convección, W

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección, W/m^2

T_{∞} = Temperatura de fluido, C°

T_s = Temperatura de la superficie, C°

A_s = Área superficial de transferencia de calor, m^2

La convección se clasifica como convección natural y forzada, dependiendo de la forma en que se inicie el movimiento del fluido, en la convección forzada el fluido es obligado a fluir sobre una superficie con ayuda de agente externos como ventiladores y bombas, la convección también se clasifica en interna y externa dependiendo de cómo fluye el fluido sobre una superficie o en un tubo (Cengel Y. A., 2011).

Números adimensionales

Numero de Reynolds. La configuración geométrica, la rugosidad, la temperatura de la superficie influye en la transición de flujo laminar a turbulento, el número de Reynolds representa la relación entre las fuerzas de inercia y fuerzas viscosas que actúan sobre un volumen determinado de un fluido, este número indica el tipo de flujo de un fluido, laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de Inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V L_c}{\nu} = \frac{\rho V L_c}{\mu} \quad (2)$$

Donde:

V = la velocidad de la corriente libre, m/s

L_c = Longitud característica de la configuración geométrica, m

ν = viscosidad cinemática, m^2/s

ρ = densidad, Kg/m^3

μ = viscosidad dinámica, $Kg/m s$

Para placas planas el cambio de flujo laminar a turbulento a una longitud crítica se da a un valor considerado para la ingeniería de $Re = 5 \times 10^5$.

Para tubos si el valor de $Re < 2300$ se tiene un flujo laminar, si $2300 < Re < 10000$ el flujo está en transición y si $Re > 10000$ el flujo es turbulento.

Numero de Prandtl. Este número representa la relación entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (3)$$

Donde:

C_p = Calor específico del fluido, $KJ/Kg^\circ K$

α = Coeficiente de difusividad térmica, m^2/s

k = Coeficiente de Conductividad térmica $W/m^\circ K$

Numero de Nusselt. El número de Nusselt representa la mejora en la transferencia de calor a través de una capa de un fluido como resultado de una convección en relación a la conducción en la misma capa, mientras mayor sea el número de Nusselt, será más eficiente la convección, si el $Nu = 1$ para una capa de un fluido significará que la transferencia de calor es por conducción pura.

$$\frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} = \frac{h \Delta T}{k \Delta T/Lc} = \frac{hLc}{k} = Nu \quad (4)$$

Donde:

\dot{q}_{conv} = La velocidad de transferencia de calor de convección por unidad de tiempo por unidad de área superficial, W/m^2

\dot{q}_{cond} = La velocidad de transferencia de calor de conducción por unidad de tiempo por unidad de área superficial, W/m^2

k = Coeficiente de conductividad térmica, $W/m K^\circ$

ΔT = Diferencia de temperaturas entre las superficies, K°

El número de Nusselt para placas planas es:

$$Nu = 0.332 Pr^{1/3} Re^{1/2}, \quad Pr > 0.6 \quad (5)$$

Diseño Térmico

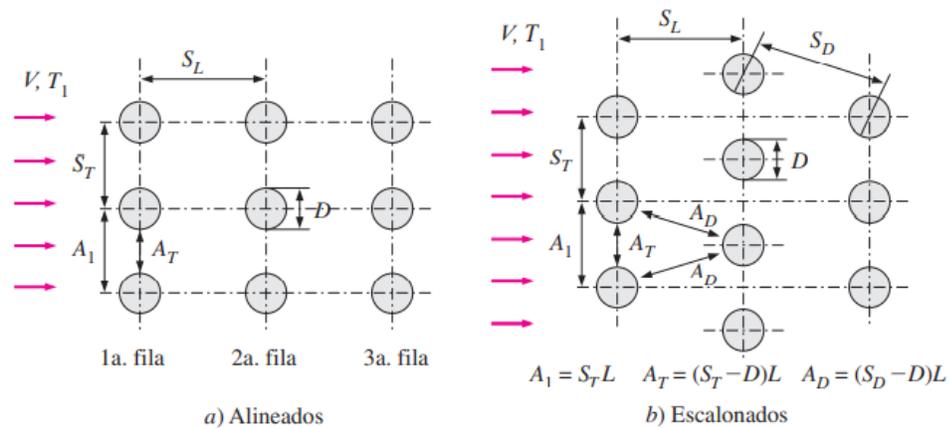
Flujo sobre banco de tubos

Los flujos en bancos de tubos son comunes en sistemas de intercambio de calor, como los condensadores y evaporadores de unidades de refrigeración y en aplicaciones que usan acondicionadores de aire, en estos sistemas un fluido fluye a través de los tubos, mientras que por la parte externa se encuentra otro fluido en dirección perpendicular, una de las aplicaciones industriales más comunes son los intercambiadores de calor de coraza y tubos.

Para el análisis de este tipo de sistemas se considera que el flujo interno que fluye por los tubos se debe analizar para todos los tubos y considerando el patrón de flujo, por eso, se tienen dos configuraciones de disposiciones que son: escalonados y alineados, como se puede observar en la **Figura 2**.

Figura 2

Configuración de tubos en bancos escalonados o alineados



Nota. En el gráfico D , es el diámetro exterior y se lo usa como longitud característica, A_1, A_T, A_D , son las áreas de flujo en los lugares indicados y L , es la longitud de los tubos. Tomado de *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y Aplicaciones* (p.440), Cengel, Y.A, 2016, McGraw-Hill.

Como se observa la disposición de los en un banco de tubos se caracteriza por:

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + (S_T/2)^2} \quad (6)$$

Donde:

S_D = Paso diagonal.

S_L = Paso longitudinal.

S_T = Paso transversal.

Cuando el fluido ingresa al banco de tubos el área de flujo tiende a disminuir, lo que ocasiona que aumente la velocidad del flujo, si se tienen una disposición escalonada la velocidad del flujo será mayor en el paso diagonal cuando las filas estén cercanas una de otra.

Si consideramos que D , es el diámetro exterior y se lo usa como longitud característica y que la velocidad del flujo en el banco de tubos está determinada por una velocidad máxima V_{max} , más que por la velocidad aproximada V que es la velocidad del flujo antes de entrar al banco de tubos, esta V_{max} está determinada bajo el principio de conservación de la masa para un fluido incompresible en estado estacionario, a partir de la ecuación (2) del número de Reynolds se expresa como:

$$Re_D = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} = \frac{V_{max} D}{\nu} \quad (7)$$

Sin embargo, esta V_{max} está condicionada a la configuración del banco de tubos, de esa forma para las configuraciones de alineados y escalonados se tiene:

Para banco de tubos alineados

$$V_{max} = \frac{S_T V}{S_T - D} \quad (8)$$

Para banco de tubos escalonados

$$V_{max} = \frac{S_T V}{2 (S_D - D)} \quad (9)$$

El estudio de flujo sobre bancos de tubos es complejo si se lo analiza desde un punto de vista analítico, pero se simplifica si se lo estudia de manera experimental, uno de los puntos a enfocarse en estos estudios es el coeficiente de transferencia de calor del banco de tubos, el

cual depende del número de tubos del banco, el número de filas, su disposición y el tamaño de los tubos.

Para el análisis del número de Nusselt (Nu_D), se considera la teoría de Zukauskas, la cual propone las siguientes correlaciones presentadas en la **Tabla 4**.

Tabla 4

Correlaciones del número de Nusselt - Teoría de Zukauskas para un flujo cruzado en banco de tubos con más de 16 filas, $0.7 < Pr < 500$

Configuración	Rango Re_D	Correlación
Alineados	0 - 100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr / Pr_s)^{0.25}$
	100 - 1000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr / Pr_s)^{0.25}$
	1000 - 2×10^5	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr / Pr_s)^{0.25}$
	2×10^5 - 2×10^6	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr / Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	0 - 500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr / Pr_s)^{0.25}$
	500 - 1000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr / Pr_s)^{0.25}$
	1000 - 2×10^5	$Nu_D = 0.35 (S_T / S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr / Pr_s)^{0.25}$
	2×10^5 - 2×10^6	$Nu_D = 0.031 (S_T / S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr / Pr_s)^{0.25}$

Nota. Para todas las propiedades, menos para Pr_s , se debe considerar una temperatura media entre las temperaturas de admisión y salida del fluido, para Pr_s se tiene que considerar T_s , que es la temperatura de la superficie del fluido que ingresa por los tubos. Tomado de *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y Aplicaciones* (p.441), Cengel, Y.A, 2016, McGraw-Hill.

Como se mencionó para los valores de todas las propiedades, excepto para Pr_s , se debe considerar una temperatura media T_m .

$$T_m = \frac{T_e + T_i}{2} \quad (10)$$

Donde:

T_e = Temperatura de salida del aire °C .

T_i = Temperatura de entrada del aire °C .

Además, cuando el número de filas de tubos $N_L < 16$, se tiene que considerar un factor de corrección F , este factor de corrección es dependiente de la configuración del banco de tubos y del número de Reynolds, los valores de F se pueden visualizar en la **Tabla 5**.

Tabla 5

Factor de corrección F para un $N_L < 16$ y $Re_D > 1000$

N_L	1	2	3	4	5	7	10	13
Alineados	0.70	0.80	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99
Escalonados	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

Nota. Tomado de Transferencia de calor y masa. Fundamentos y Aplicaciones (p.441), Cengel, Y.A, 2016, McGraw-Hill.

Una vez que se selecciona el valor de F se multiplica con el número de Nusselt y obtenemos:

$$Nu_{NL < 16} = F Nu_D \quad (11)$$

También se debe considerar la diferencia media logarítmica de temperaturas.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_e) - (T_s - T_i)}{\ln[(T_s - T_e)/(T_s - T_i)]} \quad (12)$$

Donde:

T_s = Temperatura de la superficie de ingreso del agua °C .

Se puede calcular la T_e de la siguiente manera:

$$T_e = T_s - (T_s - T_i) \exp\left(-\frac{A_s h}{\dot{m} C_p}\right) \quad (13)$$

Con todos estos datos se tiene que la transferencia de calor se puede encontrar a partir

de:

$$\dot{Q} = h A_s \Delta T_{lm} \quad (14)$$

o

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_e - T_i) \quad (15)$$

Donde:

$A_s = N_T D L$ Área de transferencia de calor m^2 .

$\dot{m} = \rho V (N_T S_T L)$ El gasto másico del fluido kg/s .

N_T = Número de tubos en un plano transversal.

N_L = Número de filas en la dirección del flujo.

ΔT_{lm} = Diferencia media logarítmica de temperatura °C .

Análisis de Intercambiadores de Calor

Es estos equipos se debe considerar que el flujo es estacionario, pues no tiende a cambiar sus condiciones de operación durante largos periodos.

La razón de transferencia de calor se determina por:

$$\dot{Q} = U A_s \Delta T_{ml} \quad (16)$$

Donde:

\dot{Q} = Razón de transferencia de calor $W/m^2\text{°C}$.

U = Coeficiente de transferencia de calor total $W/m^2\text{°C}$.

A_s = Área de transferencia de calor m^2 .

ΔT_{ml} = Diferencia media logarítmica de temperatura °C .

Resulta ventajoso relacionar la diferencia media logarítmica de temperatura con ayuda un factor de corrección para el caso de contraflujo, este factor de corrección F_1 depende de la geometría del intercambiador de calor.

$$\Delta T_{ml,CF} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{(T_{s_{aire}} - T_{e_{agua}}) - (T_{e_{aire}} - T_{s_{agua}})}{\ln\left(\frac{(T_{s_{aire}} - T_{e_{agua}})}{(T_{e_{aire}} - T_{s_{agua}})}\right)} \quad (17)$$

$$\Delta T_{ml} = F_1 \Delta T_{ml,CF} \quad (18)$$

Para ello se tienen razones entre temperaturas P y R

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (19)$$

y

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (20)$$

Donde

T_1 = Temperatura de entrada en la coraza °C .

T_2 = Temperatura de salida en la coraza °C .

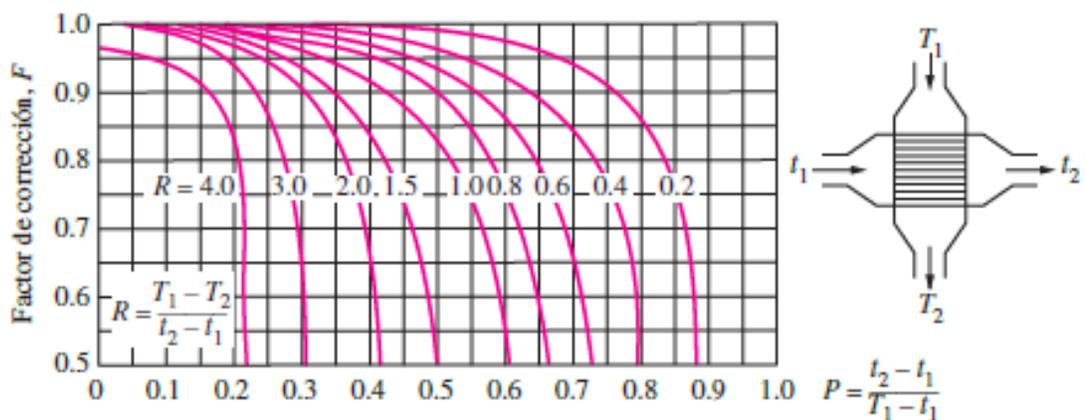
t_1 = Temperatura de entrada en los tubos °C .

t_2 = Temperatura de salida en los tubos °C .

Con estas razones en la **Figura 3** encontramos el valor de F_1 .

Figura 3

Diagrama del factor de corrección F_1



Nota. Tomado de *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y Aplicaciones* (p.645), Cengel, Y.A, 2016, McGraw-Hill.

Ciclo de Refrigeración

Ciclo Ideal

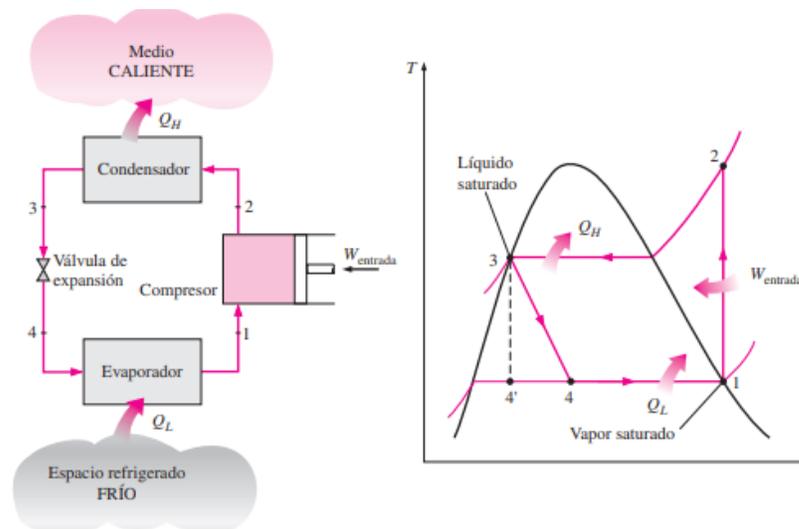
El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el que más se utiliza en refrigeradores, sistemas de acondicionamiento de aire y bombas de calor. (Cengel Y. , 2006)

Se compone de cuatro procesos:

- 1-2 Compresión isentrópica en un compresor
- 2-3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador
- 3-4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión
- 4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador

Figura 4

Ciclo ideal de refrigeración



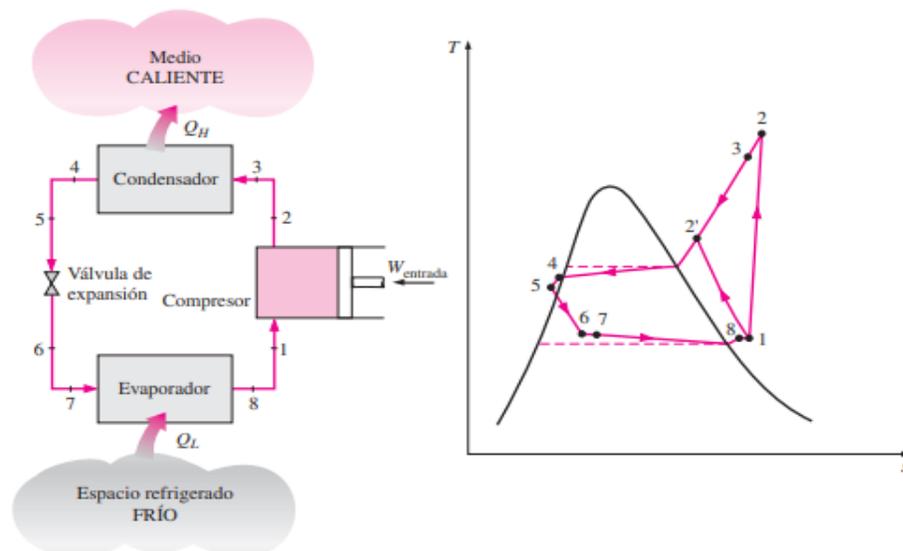
Nota. Tomado de Cengel, Y. A. (2011). Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones (cuarta ed.). México DF: Mc Graw Hill.

Ciclo de Real

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor real a diferencia del real, se caracteriza por tener un subenfriamiento a la salida del condensador y se sobrecalienta a la entrada del compresor.

Figura 5

Ciclo Real de refrigeración



Nota. Tomado de Cengel, Y. A. (2011). Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones (cuarta ed.). México DF: Mc Graw Hill.

Eliminación de calor del espacio refrigerado

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4) [kW] \quad (21)$$

Entrada de Potencia al compresor

$$\dot{W}_{entrada} = \dot{m}(h_2 - h_1)[kW] \quad (22)$$

Rechazo de calor

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3)[kW] \quad (23)$$

COP

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{entrada}} \quad (24)$$

Mantenimientos

El mantenimiento es el conjunto de actividades necesarias para realizar inspecciones de forma periódica o para reparar un equipo o dispositivo que después de fallar se vuelve a poner en un estado de funcionamiento para que continúe con su trabajo. (Medrano Márquez, Gonzáles Ajuech, & Dias de León Santiago, 2017)

Se considera como una actividad de alta relevancia, puesto que este asegura la disponibilidad de los equipos, maquinaria o dispositivos para una buena condición de operación. También es importante llevar una planeación, programación y ejecución de actividades a realizarse dependiendo de la frecuencia, importancia y diversos factores para cada equipo, con el fin de facilitar la ejecución y seguimiento de cada actividad.

Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo es el conjunto de acciones que se enfocan en reparar averías o desperfectos que se presentan en equipos o instalaciones que pierden su capacidad operacional y es necesario repararlos para seguir en funcionamiento óptimo.

La ventaja de este mantenimiento es que, al ser una actividad reactiva, hay muy poco que hacer después de la compra y antes de que suceda el problema, además que no existe la necesidad de realizar una planificación compleja y proporciona una solución inmediata al problema. (Super User, 2020).

Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo es una serie de actividades programadas que previenen la ocurrencia de fallas, sus principales actividades incluyen: limpieza, lubricación, cambios programados de piezas, ajuste de elementos de los equipos, un punto importante de este tipo de mantenimiento es que se controlan de manera periódica.

El objetivo del mantenimiento preventivo es reducir las interrupciones y la depreciación de los equipos, maquinaria o instalación dentro de una empresa, conservando óptimas funciones de operación.

Mantenimiento Modificativo

Este tipo de mantenimiento se basa en la modificación de un equipo, maquinaria o instalación de una empresa para evitar que se produzcan determinados fallos, a través de trabajos de mejora y modernización de componentes, renovación o reconstrucción de equipos de trabajo para adaptarlas a las necesidades de la empresa, además se puede realizar un reacondicionamiento para alargar la vida útil (Rodríguez Machado, 2012).

Automatización

Sensores

El sensor es un dispositivo que tiene como función detectar cambios producidos por un estímulo físico y transformar dicho estímulo en una señal que puede ser medida o almacenada,

los sensores pueden medir la temperatura, la presión, caudal, vibraciones, humedad, sonido, etc.

Transmisor

Un transmisor es un conjunto conformado por el sensor y el acondicionador de señal, se encuentran integrados o como dispositivo independiente, el acondicionador de señal puede estar conectado al sensor a través de conductos eléctricos, canales, etc.

Transductor

Es el dispositivo que transforma la energía de entrada en una energía de salida, el termino generalmente se usaba para referirse a un dispositivo que convertía estímulos mecánicos del medio ambiente en señales eléctricas, pero actualmente estos dispositivos pueden entregar señales neumáticas e hidráulicas.

Sistemas de Control

Un sistema de control de procesos es un conjunto de dispositivos de diferentes tipos, eléctrico, neumático, hidráulico, mecánico, entre otros. Organizados de tal forma que se pueda cumplir un objetivo, basado en 3 elementos principales, la variable que se busca controlar, el actuador y un punto de referencia.

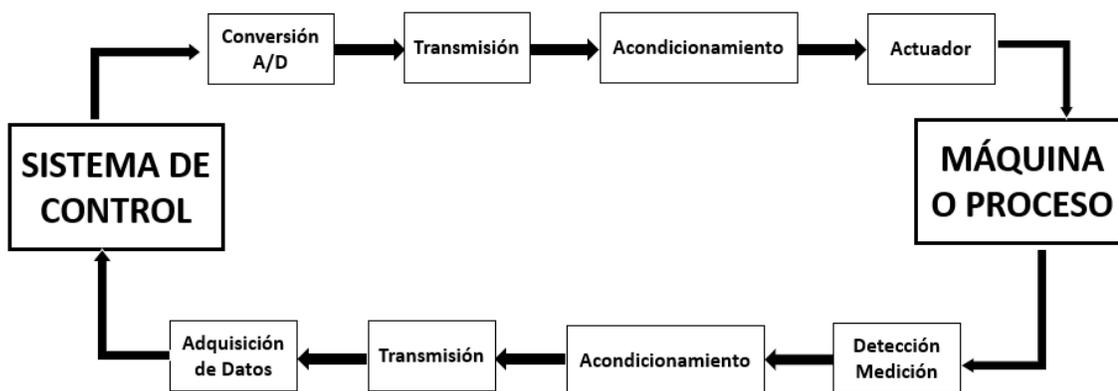
Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el que no se cuenta con una retroalimentación sobre la variable que se tiene que controlar, es decir, la salida no depende de la entrada, como es el caso de un amplificador de sonido en un equipo modular.

Cuando se tiene la información sobre la variable se trata de un sistema de control de lazo cerrado, esta información se obtiene mediante el uso de sensores que son colocados de manera distribuida para lograr hacer que el proceso sea autónomo como se muestra en **Figura**

6.

Figura 6

Diagrama de un Sistema de Control

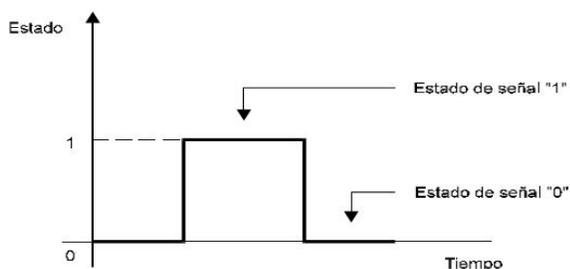


Tipos de Señales

La señal de tipo discreta se caracteriza por que solo puede adoptar dos estados con valores de 1 y 0, los cuales cuando se relacionan con la corriente eléctrica, interpreta: existe o no tensión, indistintamente de la magnitud, como se puede observar en la **Figura 7**.

Figura 7

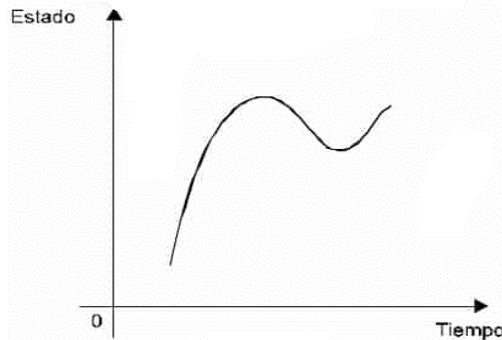
Señal Tipo: Digital



La señal analógica es aquella que sufre una variación en un lapso de tiempo y de manera continua, como se puede observar en la **Figura 8**, considerando las magnitudes cuantitativas de las variables que se midan, como: temperatura, presión, velocidad, flujo, presión, etc.

Figura 8

Señal Tipo: Analógica



Acondicionamiento de Señales

La etapa de acondicionamiento en un sistema de control permite la transformación de cualquier naturaleza en una señal con calidad, ya sea eléctrica o de voltaje, a través de las siguientes actividades:

- Amplificación o Atenuación.
- Linealización.
- Aislamiento.
- Filtrar.
- Alimentación o compensación.
- Multiplexado.

El acondicionamiento de señal aísla prácticamente todo el sistema de control de los sensores, es decir, protege todo el sistema, el controlador, amplificador, atenuador, etc., y sus respectivas partes, menos al sensor.

Adquisición de Datos

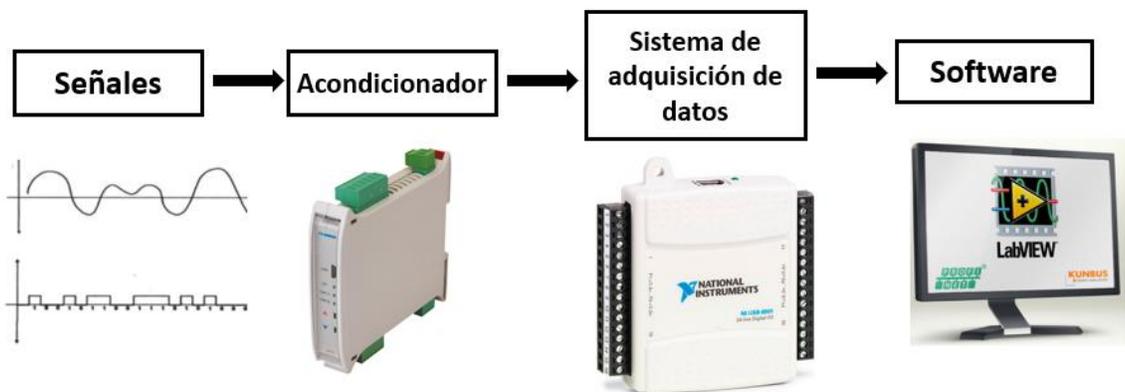
El objetivo de esta etapa es transformar la señal en un formato que sea aceptado por el sistema de control, en este proceso se puede almacenar, procesar, analizar la información

ingresada después del acondicionamiento de señal. En la etapa de conversión analógica a digital de los datos se debe considerar factores como: la señal de entrada, tasa de muestreo, resolución, rango, ganancia. Para esto se dispone de softwares encargados de realizar este proceso que permitirán que el computador pueda recibir, multiplicar información a través del análisis o comparaciones.

Al momento de diseñar un sistema de adquisición de datos se debe considerar que el sistema sea fijo o móvil, los tipos de señales que se va a obtener, la frecuencia de la entrada, la resolución y el rango de la señal de entrada, la compatibilidad del hardware con software y el costo del sistema.

Figura 9

Sistema de Adquisición de Datos



Software LabView

LabView es un software de la NI Instruments, este programa ofrece una programación gráfica para aplicaciones donde se requiera tener una visualización de control y diseño. Una de sus características principales es su entorno programable amigable, su facilidad de uso y su versatilidad, ya que se lo puede usar con microprocesadores como el Arduino, con PLC's y

tarjetas DAQ, entre otros, adicionalmente LabView tiene la facilidad de crear un número ilimitado de páginas de código de texto para programaciones complejas, el manejo de miles de entradas y salidas es una ventaja de usar este software.

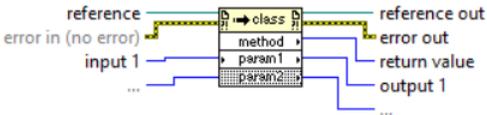
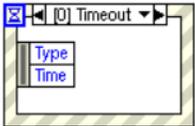
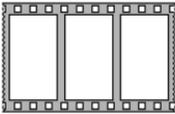
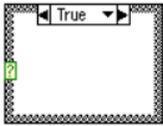
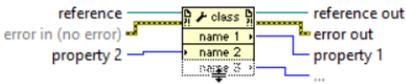
Entre los lenguajes que pueden interactuar con este software tenemos; DLL, ActiveX, Multisim, Matlab, Simulink, AutoCAD, SolidWorks, etc., además contiene herramientas textuales y gráficas para el procesamiento de señales digitales, se puede realizar el tratamiento y adquisición de imágenes. Como se indicó en LabView la programación no se escribe, es una interfaz gráfica que cuenta con bloques pre-cargados que facilita la creación de proyectos al usuario y que se genere un ahorro de tiempo que puede ser invertido en la interfaz gráfica y la interacción de la misma con el usuario.

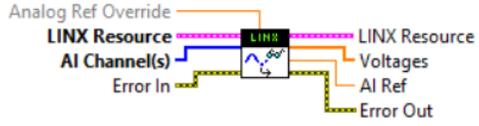
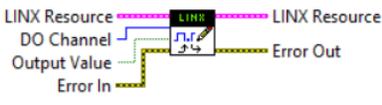
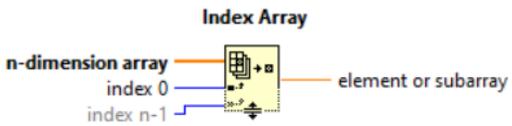
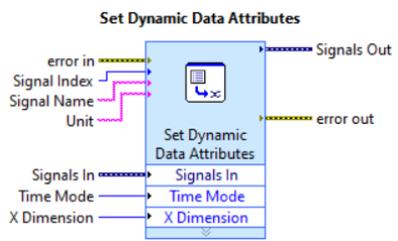
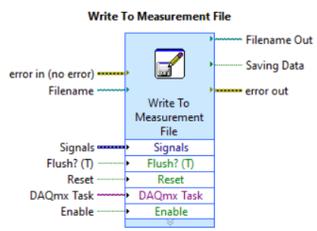
El software consta con dos partes, el diagrama de bloques y el panel frontal, que básicamente se diferencian en que uno es manejado por el usuario y otro por el programador. El panel frontal es la interfaz que maneja el usuario en tiempo real, como lectura de datos de sensores, además en esta interfaz se incluyen los controles que son entradas que pueden ser marcadores, botones, etc., y los indicadores que son salidas y pueden ser gráficas. Mientras que el diagrama de bloques es donde se colocan los iconos que realizan funciones y se conectan con el código de control del programa (Anónimo, 2021).

Adicionalmente, conocer el tipo de bloques de programación que serán útiles para la aplicación que se requiera en la **Tabla 6**.

Tabla 6

Bloques y Estructuras de LabView.

BLOQUE	FUNCIÓN
<p>Static VI Reference:</p> 	<p>Nos permite ejecutar un VI específico.</p>
<p>Invoke Node</p> 	<p>Invoca un método o acción a una referencia.</p>
<p>Event Structure</p> 	<p>Espera a que un evento ocurra para luego ejecutar el caso apropiado para manejar el evento.</p>
<p>While Loop</p> 	<p>Ejecuta el código hasta que una acción específica ocurra.</p>
<p>Flat Sequence Structure [Flat Sequence]</p> 	<p>Consta de dos o más diagramas que se ejecutan secuencialmente uno después de otro.</p>
<p>Case Structure</p> 	<p>Contiene 2 o más casos que depende del controlador booleano conectado.</p>
<p>Property Node</p> 	<p>Lee o escribe propiedades de una referencia.</p>
<p>Serial Port</p> 	<p>Permite la comunicación serial del Arduino con el software LabView.</p>

BLOQUE	FUNCIÓN
 <p>The diagram shows a LINX Resource AI Channel(s) block. It has an Analog Ref Override input, LINX Resource inputs, AI Channel(s) input, Error In input, LINX Resource outputs, Voltages output, AI Ref output, and Error Out output.</p>	<p>Permite leer las entradas analógicas del Arduino, declarando un arreglo con los pines analógicos utilizados.</p>
 <p>The diagram shows a LINX Resource DO Channel block. It has LINX Resource inputs, DO Channel input, Output Value input, Error In input, LINX Resource outputs, and Error Out output.</p>	<p>Escribe sobre los pines digitales declarados del Arduino.</p>
 <p>The diagram shows an Index Array block. It has an n-dimension array input, index 0 input, index n-1 input, and an element or subarray output.</p>	<p>Permite manejar el arreglo de señales analógicas declaradas en el bloque Analog Read.</p>
 <p>The diagram shows a MEAN block. It has an X input and outputs for mean and error.</p>	<p>Calcula la media de un grupo de valores.</p>
 <p>The diagram shows a LINX Resource block. It has an Error In input and an Error Out output.</p>	<p>Cierra la comunicación serial con el Arduino.</p>
 <p>The diagram shows a Set Dynamic Data Attributes block. It has error in, Signal Index, Signal Name, and Unit inputs. It has Signals Out and error out outputs. It also has Signals In, Time Mode, and X Dimension inputs.</p>	<p>Establece los atributos de los datos dinámicos que conecta a Signals In.</p>
 <p>The diagram shows a Write To Measurement File block. It has error in (no error) and Filename inputs. It has Filename Out, Saving Data, and error out outputs. It also has Signals, Flush? (T), Reset, DAQmx Task, and Enable inputs.</p>	<p>Escribe los datos tomados en un archivo de texto o Excel.</p>

Capítulo III Recuperación y mantenimiento del equipo

Levantamiento técnico del estado actual del equipo.

El Túnel de Aire Multipropósito del Laboratorio de Conversión de Energía es un equipo en el que no se ha llevado a cabo un mantenimiento rutinario adecuado por tales razones muchos de sus componentes no eran utilizados.

Inicialmente se hizo el levantamiento técnico del estado actual del túnel para conocer las condiciones iniciales con las que se recibió el equipo. Al ser un equipo modular el levantamiento se realizó a cada componente individualmente como se muestra en la **Tabla 7**.

Tabla 7

Detalle Levantamiento Técnico del Estado Actual del Túnel de Aire Multipropósito.

Módulo	Referencia
Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas.	Tabla 9
Intercambiador de Calor de Tubos Lisos.	Tabla 11
Evaporador y Unidad de Refrigeración.	Tabla 13
Secciones Adicionales.	Tabla 15

Se realizó un mantenimiento correctivo a todos los componentes del equipo con el fin de realizar una recuperación energética y adecuar componentes adicionales para mejorar su desempeño.

Los módulos a los que se realizó mantenimiento son los mostrados en la **Tabla 8**.

Tabla 8

Detalle Después del Mantenimiento Correctivo del Túnel de Aire Multipropósito.

Módulo	Referencia
Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas.	Tabla 10
Intercambiador de Calor de Tubos Lisos.	Tabla 12

Módulo	Referencia
Evaporador y Unidad de Refrigeración.	Tabla 14
Secciones Adicionales.	Tabla 16

Mantenimiento Correctivo del Módulo Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas.

Tabla 9

Levantamiento Técnico de Módulo Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas. [Estado Actual]

Componente	Imagen	Observaciones
Aislante		- Desgastado y húmedo debido a filtraciones producto de las fugas de agua.
Carcasa inferior		- Pintura desgastada y con notable desprendimiento en la superficie interna. - Láminas dobladas producto de golpes por mala manipulación.
Carcasa superior		- Pintura desgastada y con notable desprendimiento en la superficie interna y externa.

Componente	Imagen	Observaciones
Empaques		<ul style="list-style-type: none"> - Rotos producto del tiempo de vida y la falta de mantenimiento preventivo.
Tornillos		<ul style="list-style-type: none"> - Oxidados o aislados en la parte de la rosca, producto de las fugas que tenía el equipo.
Cabezotes superiores		<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de calcificaciones e incrustaciones debido al agua no tratada. - Cabezote central remordido, lo que impide el cambio de simple a triple paso, debido a desgaste del o' ring interno lo que ocasiona la filtración de agua, resultando en calcificación dentro del bulón que permite realizar el cambio de paso.
Cabezotes inferiores		
Tubos con aletas de cobre		<ul style="list-style-type: none"> - Buen estado - Presencia de incrustaciones, sucios.

Componente	Imagen	Observaciones
Bridas		<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de calcificaciones. - Empaques rotos y desgastados. - Óxido
Brida con acople 1"		<ul style="list-style-type: none"> - Teflón desgastado. - Óxido.
Placas de bronce		<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de incrustaciones y calcificaciones. - Óxido. - Sucio
Módulo y binchas		<ul style="list-style-type: none"> - Módulo sucio y desgastado. - Binchas oxidadas y dobladas. - Madera seca en buen estado la formica que la recubre.

Componente	Imagen	Observaciones
Abrazaderas y mangueras		<ul style="list-style-type: none"> - Abrazaderas oxidadas y remordidas. - Mangueras con fugas.

Nota: Fuente: Propia

Tabla 10

Módulo Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas. [Después del Mantenimiento Correctivo].

Componente	Imagen	Observaciones
Cabezotes inferiores		<ul style="list-style-type: none"> - Se realizó una limpieza profunda con cepillo de cobre. - Se lijó. - Al cabezote del medio se le extrajo el bulón, se limpió, se cambió de empaque y se engrasó.
Cabezotes superiores		<ul style="list-style-type: none"> - Se abrieron los agujeros para pernos M5 en la unión del cabezote con la placa de bronce. - Se realizó rosca M3 para la unión de cabezotes con bridas.

Componente	Imagen	Observaciones
Bridas		<ul style="list-style-type: none"> - Se limpiaron con cepillo de cobre. - Se puso empaques nuevos de neopreno de 1/8". - Se lijó la superficie para retirar el óxido y restos de calcificación.
Brida con acople 1"		<ul style="list-style-type: none"> - Se limpiaron con cepillos de cobre. - Se cambió el teflón. - Se abrieron los agujeros para pernos M3.
Aislante		<ul style="list-style-type: none"> - Se colocó aislante nuevo RUBATEX de 1/2".
Carcasa		<ul style="list-style-type: none"> - Las carcasas fueron lijadas y pintadas. - El aislante fue colocado. - Se colocaron letreros de triple y simple paso.
Sondas		<ul style="list-style-type: none"> - Las sondas de temperatura fueron adaptadas a los neoplos de 3/4", con casquillos, anillos y manguera de 1/4". - Se colocaron 4 sondas.

Componente	Imagen	Observaciones
Binchas	 	<ul style="list-style-type: none"> - Se enderezaron, retiraron el óxido, lijaron y pintaron todas las binchas.
Módulo	 	<ul style="list-style-type: none"> - Se lijó y pintó el módulo. - Se cambiaron las patas de los soportes en la base. - Se baquetearon los tubos. - Se restauraron las binchas. - Se cambiaron los tornillos de fijación de las carcasas al módulo. - Se limpiaron y enderezaron las aletas.

Nota: Fuente: Propia

Mantenimiento Correctivo del Módulo Intercambiador de Calor de Tubos Lisos.

Tabla 11

Levantamiento Técnico del Módulo Intercambiador de Calor de Tubos Lisos. [Estado Actual].

Componente	Imagen	Observaciones
Aislante		<ul style="list-style-type: none"> - Desgastado y húmedo debido a las filtraciones de agua.
Carcasa inferior		<ul style="list-style-type: none"> - Madera seca en buen estado. - Exterior manchado con pintura desgastada - Láminas metálicas dobladas.
Carcasa superior		<ul style="list-style-type: none"> - Madera seca en buen estado. - Exterior manchado con pintura desgastada - Láminas metálicas dobladas.
Empaques		<ul style="list-style-type: none"> - Rotos
Tornillos		<ul style="list-style-type: none"> - Oxidados o con roscas desgastadas
Cabezotes superiores		<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de calcificaciones e incrustaciones debido al líquido de trabajo.

Componente	Imagen	Observaciones
Cabezotes inferiores	 	<ul style="list-style-type: none"> - Cabezote central atorado, lo que impide el cambio de simple a triple paso.
Tubos lisos de cobre		<ul style="list-style-type: none"> - Buen estado - Presencia de incrustaciones, sucios.
Bridas		<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de óxido. - Calcificaciones. - Empaques rotos y desgastados.
Brida con acople 1"		<ul style="list-style-type: none"> - Teflón desgastado. - Óxido.
Placas de bronce		<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de óxido. - Presencia de incrustaciones y calcificaciones.
Módulo y binchas		<ul style="list-style-type: none"> - Módulo sucio y desgastado. - Binchas dobladas y oxidadas.

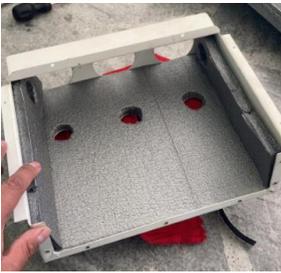
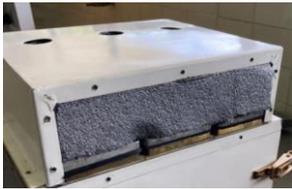
Componente	Imagen	Observaciones
Abrazaderas y mangueras		<ul style="list-style-type: none"> - Mangueras desgastadas y con fugas. - Abrazaderas oxidadas y rotas.

Nota: Fuente: Propia

Tabla 12

Módulo Intercambiador de Calor de Tubos Lisos. [Después del Mantenimiento Correctivo].

Componente	Imagen	Observaciones
Cabezotes inferiores		<ul style="list-style-type: none"> - Se realizó una limpieza profunda con cepillo de cobre. - Se lijó el interior y exterior. - Al cabezote del medio se le extrajo el bulón, se limpió, se cambió de empaque o' ring y se engrasó. - Se abrieron los agujeros para pernos M5 en la unión del cabezote con la placa de bronce. - Se realizó rosca M3 para la unión de cabezotes con bridas. - Se realizaron nuevas perforaciones en el cabezote de brida ciega debido a pernos aislados.
Cabezotes superiores		
		
		

Componente	Imagen	Observaciones
Bridas		<ul style="list-style-type: none"> - Se lijaron y cepillaron con cepillo de cobre. - Se cambiaron los empaques.
Brida con acople 1"		<ul style="list-style-type: none"> - Se cambió el teflón. - Se limpió con cepillo de cobre.
Aislante		<ul style="list-style-type: none"> - Se lijaron y pintaron las carcasas.
Aislante		<ul style="list-style-type: none"> - Se colocó un nuevo aislante. - Se colocaron letreros de triple y simple paso.
Sondas		<ul style="list-style-type: none"> - Se adaptaron las sondas a los neoplos de 3/4" con casquillos, anillos y mangueras de 1/4". - Se colocaron 4 sondas.

Componente	Imagen	Observaciones
Binchas		- Se enderezaron, retiraron el óxido, lijaron y pintaron todas las binchas.
Módulo		- Se lijó y pintó el módulo. - Se cambiaron las patas. - Se baquetearon los tubos. - Se restauraron las binchas. - Se cambiaron los tornillos de fijación de las carcasas al módulo. - Se instalaron las sondas de temperatura.

Nota: Fuente: Propia

Mantenimiento Correctivo del Módulo Evaporador y Unidad de Refrigeración.

Tabla 13

Levantamiento Técnico del Módulo Evaporador y Unidad de Refrigeración. [Estado Actual].

Componente	Imagen	Observaciones
Evaporador		- Tubos en buen estado. - Aletas en buen estado. - Aislante desgastado y húmedo.

Componente	Imagen	Observaciones
Acoples	 	<ul style="list-style-type: none">- Oxidados.- Atorados
Mangueras		<ul style="list-style-type: none">- Buen estado
Manómetro		<ul style="list-style-type: none">- Desconectado.

Componente	Imagen	Observaciones
Válvula de expansión		<ul style="list-style-type: none"> - Bulbo roto sin aislamiento. - Mal calibrada
Compresor		<ul style="list-style-type: none"> - Mala compresión. - Válvulas sucias. - Vibraciones. - Sin aceite. - Sin refrigerante.
Condensador		<ul style="list-style-type: none"> - Láminas dobladas. - Rejilla floja. - Ventilador desalineado.
Presostato de alta		<ul style="list-style-type: none"> - Buen estado.
Botella de líquido		<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de fugas. - Válvula rotolock dañada.

Componente	Imagen	Observaciones
Bornera del motor		<ul style="list-style-type: none"> - En buen estado. - Dos cables rotos
Válvula rotolock		<ul style="list-style-type: none"> - Dañado el calibrador. - Sin anillo. - Presencia de fugas. - Visor roto.

Nota: Fuente: Propia

Tabla 14

Módulo Evaporador y Unidad de Refrigeración. [Después del Mantenimiento Correctivo].

Componente	Imagen	Observación
Evaporador		<ul style="list-style-type: none"> - Se limpió y enderezó las aletas. - Se baquetearon los tubos.

Componente	Imagen	Observación
Acoples	 	- Se engrasó los rodamientos de acoples y se retiró el óxido.
Mangueras		- Buen estado
Manómetro		- Se conectó a la salida del evaporador.
Válvula de expansión		- Se calibró el sobrecalentamiento. - Se aisló el bulbo.

Componente	Imagen	Observación
Compresor		<ul style="list-style-type: none"> - Se cambió de aceite. - Se limpiaron sus componentes. - Se ajustó los eliminadores de vibración.
Condensador		<ul style="list-style-type: none"> - Se enderezaron las aletas. - Se ajustó la rejilla. - Se alineó el ventilador. - No se encontró fugas.
Presostato de alta		- Buen estado.
Botella de líquido		<ul style="list-style-type: none"> - Se abrió totalmente la válvula rotolock. - Se inspeccionó la presencia de fugas.
Bornera del motor		- En buen estado.

Componente	Imagen	Observación
Válvula de cierre		- Se instaló una nueva válvula para controlar el retorno del refrigerante a la salida de la botella de líquido.
Filtro y visor de líquido		- Se colocó un filtro secador de humedad y un visor de líquido.

Nota: Fuente: Propia

Mantenimiento Correctivo de Secciones Adicionales de Túnel de Aire.

Tabla 15

Secciones Adicionales del Túnel de Aire. [Estado Actual].

Componente	Imagen	Observación
Caja de resistencias		<ul style="list-style-type: none"> - Resistencias sucias. - Caja y fórmica quemada debido al calor de las resistencias. - Controlador de potencia atorado.

Componente	Imagen	Observación
Entrada del túnel		<ul style="list-style-type: none"> - Desgastada y trizada. - Tubos para toma de presión doblados.
Cono del ventilador coaxial		<ul style="list-style-type: none"> - Golpeado y despintado.
Secciones con visores	 	<ul style="list-style-type: none"> - Desgastados y despintados. - Visores sucios y rayados. - Soportes sin fórmica. - Patas de caucho rotas.
Ventilador coaxial		<ul style="list-style-type: none"> - Buen estado.
Ventilador axial		<ul style="list-style-type: none"> - Buen estado.

Tabla 16

Secciones Adicionales del Túnel de Aire. [Después del Mantenimiento Correctivo].

Componente	Imagen	Observaciones
Caja de resistencias		<ul style="list-style-type: none"> - Se cambió toda la caja y se adecuó un sistema de encendido automático. - Se limpiaron las resistencias. - Se restauraron las binchas. - Se pintó la nueva caja.
Entrada del túnel		<ul style="list-style-type: none"> - Se cambió toda la caja y se pintó. - Los tubos de toma de presión se enderezaron y comprobaron que no haya fugas.
Cono del ventilador coaxial		<ul style="list-style-type: none"> - Se lijó todo el cono y se pintó. - Se corrigieron abolladuras.
Secciones con visores		<ul style="list-style-type: none"> - Se desarmaron completamente para lijarlos y pintarlos. - Se pulieron los visores. - Se colocó la fórmica en los soportes. - Se colocaron nuevas patas de caucho.

Componente	Imagen	Observaciones
Ventilador coaxial		- Se limpió la turbina.
Ventilador axial		- Se limpió la turbina.

Resultados del Mantenimiento

Finalmente, después de todos los trabajos de mantenimiento correctivos realizados a los módulos mostrados en la **Tabla 8** se consiguió mejoras no solo de apariencia física, sino también para el funcionamiento y desempeño de cada uno de los componentes del túnel, ya que se cambiaron piezas y en algunos casos se modificaron.

Figura 10

Túnel de aire multipropósito, ensamblado después del mantenimiento correctivo



Nota. Se colocó la unidad condensadora debajo del equipo, colocando un soporte de madera. Fuente: Propia.

Pruebas del funcionamiento del equipo

Condiciones de Prueba

Las pruebas son indispensables para verificar el correcto funcionamiento de los equipos, se determinaron ciertas condiciones, tanto en la temperatura del agua que se va a usar, el caudal de la bomba y la presión de operación de la misma, a las cuales se consideró que los equipos sometidos a estas condiciones iban a estar sometidos a su máxima capacidad, lo que nos asegura que se comportarán de manera correcta por debajo de estas condiciones:

- Temperatura mínima del reservorio de agua: 3°C
- Temperatura ambiente: aprox. 24 °C
- Caudal agua: aprox. 40 LPM
- Presión: aprox. 2 bar

Pruebas de fugas

Para el intercambiador de calor de tubos con aletas y tubos lisos (**Figura 11 y Figura 12**) se realizó una prueba de operación, bajo las condiciones mencionadas anteriormente, en simple y triple paso, en el cuál se evidencio que no existía fuga por los tubos de cobre con aletas, ni en los lisos, todos los empaques de neopreno cumplían su función correctamente y no dejaban que existan fugas en los cabezotes y en las bridas, además, en los neplos colocados para la toma de temperatura tampoco se encontró fuga alguna.

Figura 11

Prueba de fugas al intercambiador de calor de tubos con aletas

**Figura 12**

Prueba de fugas al intercambiador de calor de tubos lisos



Pruebas de las resistencias eléctricas

Con ayuda de un multímetro y una pinza amperimétrica se procedió a tomar los datos de corriente y voltaje en cada una de las resistencias, teniendo como resultado los valores obtenidos en la **Tabla 17**, y con ayuda de la ecuación (25), calculamos la potencia eléctrica.

$$P = V * I \quad (25)$$

Tabla 17*Datos de voltaje y corriente medidos en las resistencias*

Resistencia	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Resistencia 1	217	2.30	499.10
Resistencia 2	216	2.29	494,64
Resistencia 3	217	2.30	499,10
Resistencia 4	217	2.29	496,93

Capítulo IV Automatización, diseño eléctrico e implementación del sistema de adquisición de datos.

Automatización

La automatización de equipos dentro del laboratorio de Conversión de Energía permite que los estudiantes realicen prácticas de manera más rápida y eficaz, evitando cometer errores y obteniendo datos de manera más confiable.

Es por eso que usando contactores, relés, Arduino Mega2560, se automatizó la obtención de datos del túnel de aire multipropósito, creando también una interfaz HMI (Human-machine interface) realizada en LabView, para la lectura de datos de temperatura y presión, con sus respectivos sensores, todos estos equipos se detallarán a continuación, indicado cada uno de sus características principales.

Diseño del sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos es un proceso en el cual a través de algún microprocesador se procesan datos en tiempo real de un fenómeno físico u eléctrico, como voltaje, corriente, temperatura, presión, caudal, etc. Este proceso de adquisición de datos empieza con una señal de entrada emitida por algún fenómeno físico y que es leído por un sensor, esta señal dependiendo del dispositivo usado para leerla ya sea un sensor o un transductor será acondicionada para que a través de una placa de adquisición de datos esta pueda procesar la señal y pasarla a un PC, usando cualquier HMI que se requiera.

En un proceso de automatización el factor económico es un determinante para la adquisición de equipos que se implementarán en la automatización, también se debe considerar el proceso que se requiere automatizar, la cantidad de datos que se van a manejar, el tipo de

variables que intervienen, el presupuesto disponible y la disponibilidad de los equipos que se quieran usar.

Por ello para la selección de la tarjeta de adquisición de datos se consideró diferentes opciones disponibles en el mercado y se realizó la siguiente matriz de decisión para determinar cuál sería la mejor opción considerando los siguientes requisitos mínimos que tendría que poder procesar la tarjeta de adquisición de datos:

- Mínimo 12 entradas analógicas
- Mínimo 6 salidas digitales
- Alimentación de 5-24 V DC

Entre las posibles tarjetas de adquisición de datos que satisfacen esos requisitos tenemos

- Microprocesador Arduino Mega2560
- DAQ NI USB-6009

Tabla 18

Matriz de decisión de la tarjeta de adquisición de datos

Parámetro	Ponderación	Arduino Mega2560	DAQ NI USB-6009
1.-Disponibilidad en el mercado	10	10	8
2.-Facilidad de instalación	10	9	9
3.-Capacidad de manejo de datos	10	9	10
4.-Confiabilidad	10	8	9
5.- Programación	10	10	9
6.-Costo del equipo	10	10	5
7.-Funcionalidad	10	10	10
Puntuación Total	70	66	60

Después de realizar este análisis entre las dos opciones más factibles para este proyecto en esta matriz de decisión se optó por el microprocesador Arduino Mega2560, ya que maneja de manera satisfactoria la cantidad de datos que se requiere y a su vez es una opción económica y de fácil acceso en el mercado.

El Arduino Mega2560 es un microcontrolador, que permite realizar diferentes aplicaciones que requieran de una comunicación con un ordenador, debido a su facilidad de programación y su versatilidad. Este microcontrolador tiene cuatro puertos serie UART, una conexión USB, un conector para una fuente de alimentación, un botón de reset y un conector ICSP para programar, adicionalmente tiene 16 entradas analógicas, 54 E/S digitales de las cuales 15 pueden ser usados como salidas PWM.

Figura 13

Placa Arduino Mega2560, instalada en el armario eléctrico

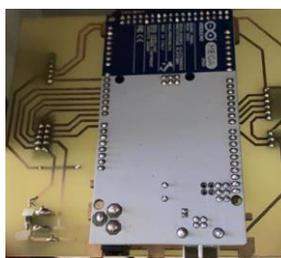


Tabla 19

Características Técnicas del Arduino Mega2560

Referencia	Tipo
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje funcionamiento	5.0 V
Voltaje de entrada	7-12 V
Voltajes mínimo y máximo de entrada	6-20 V
Pines E/S digitales	54 (15 son salida PWM)
Pines de entrada analógica	16

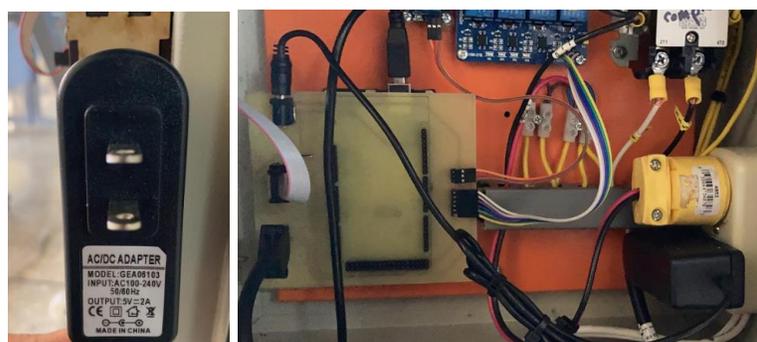
Referencia	Tipo
Corriente CC para pin E/S	20 mA
Corriente CC para pin 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	256 KB
Frecuencia	16 MHz
Peso	37 g
Ancho	53.3 mm
Longitud	101.5 mm

Nota. Los datos de las especificaciones técnicas del Arduino Mega2560 fueron tomados de (Alvear, 2008)

Adicionalmente el Arduino Mega2560 está equipado con un jack para la alimentación externa, para este proyecto se usó una fuente de alimentación externa de 120 VAC/ 5V DC como se muestra en la **Figura 14**.

Figura 14

Fuente de alimentación AC/DC para el Arduino Mega2560



Nota. La fuente de alimentación se encuentra conectada a la placa diseñada, es el modelo GEA05103, INPUT: AC100-240V AC 50/60Hz, OUTPUT: 5V DC/ 2A. Fuente: propia.

Diseño de Placas

Para el diseño de las placas se utilizó el software Proteus Profesional 8.8, primero se realizó el esquemático donde se insertó los componentes y posteriormente el Layout donde se rutearon las pistas de las placas, se diseñaron dos placas:

- Placa Principal (P2): ubicada sobre el Arduino, coincidente con los pines de este.
- Placa Secundaria (P1): ubicada a un costado del tablero eléctrico, en esta se conectarán las sondas de temperatura.
- Las bases de las placas son de baquelita y las impresiones de las pistas se las hizo en cobre.

Diseño de la Placa Principal

En la

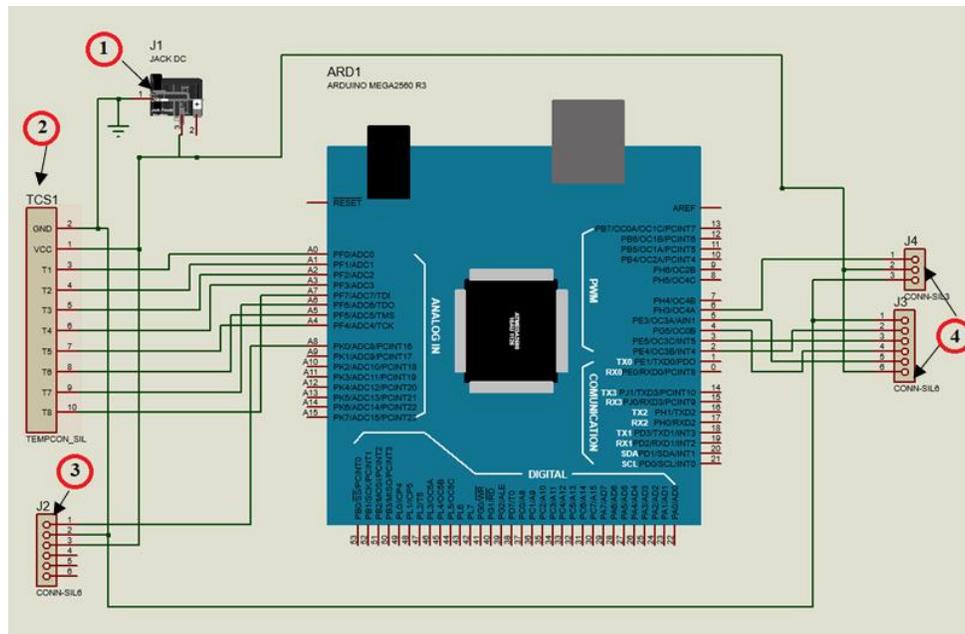
Figura 15 se encuentra el esquemático de la placa principal, en esta ventana colocamos los componentes y realizamos las conexiones.

Los componentes utilizados fueron:

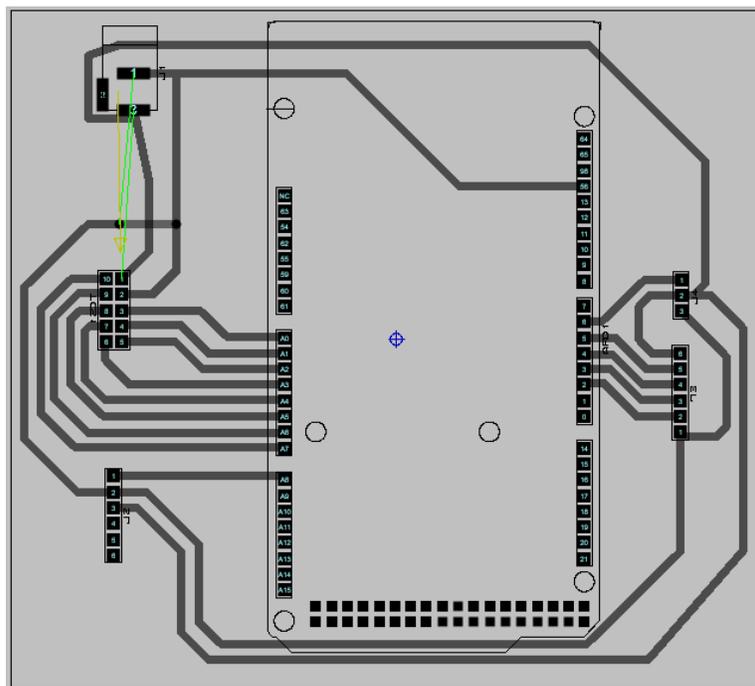
1. Jack DC: usado para la alimentación de 5 V de las placas.
2. Conector Flat Hembra 10 pines: usado para conectar los pines analógicos del Arduino de la placa principal a la secundaria con un cable flat macho.
3. Conector Arduino hembra 6 pines: usado para conectar el sensor de presión MPX5010DP.
4. Conector Arduino macho 3 y 6 pines: usados para conectar los pines digitales del Arduino al módulo de cuatro relés y al relé individual.

Figura 15

Diseño de la placa en Proteus Professional 8.8



En la **Figura 16** se encuentra el Layout de la placa principal (P2), se realizó el ruteado de las pistas con los respectivos footprints de cada componente, las conexiones de los pines del Arduino a la placa principal y sus componentes están detallados en las siguientes tablas: **Tabla 20**, **Tabla 21**, **Tabla 22**, **Tabla 23**, **Tabla 24**.

Figura 16*Layout de la placa Principal (P2)*

Nota. La placa principal corresponde al código P2 de los planos entregados. Fuente: propia.

Tabla 20*Detalle de Conexiones Arduino a Jack DC*

Arduino MEGA 2560	Jack DC
GND [Pin 56]	1
VCC [Fuente de 5V]	3

Tabla 21*Detalle de Conexiones Arduino a Conector Flat Hembra*

Arduino MEGA 2560	Conector Flat Hembra
VCC [Jack DC]	1
GND [Jack DC]	2
A0	3
A1	4
A2	5
A3	6
A4	7
A5	8
A6	9
A7	10

Tabla 22*Detalle de Conexiones Arduino a Conector Arduino hembra*

Arduino MEGA 2560	Conector Arduino Hembra
A8	1
VCC [Jack DC]	3
GND [Jack DC]	2

Tabla 23*Detalle de Conexiones Arduino a Conector Arduino Macho 6 pines*

Arduino MEGA 2560 (Pines Digitales)	Conector Arduino Macho 6 Pines
VCC [Jack DC]	6
GND [Jack DC]	1
2	2
3	3
4	4
5	5

Tabla 24*Detalle de Conexiones Arduino a Conector Arduino Macho 3 pines*

Arduino MEGA 2560 (Pines Digitales)	Conector Arduino Macho 6 Pines
VCC [Jack DC]	6
GND [Jack DC]	2
6	1

Diseño de la Placa Secundaria

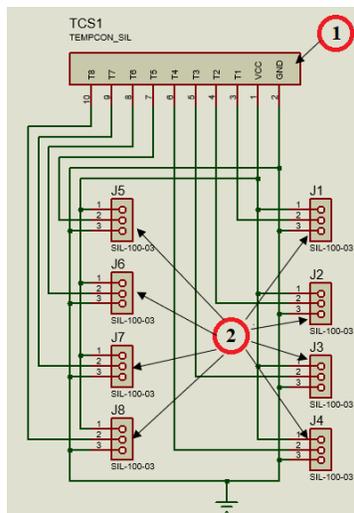
En la **Figura 17** se encuentra el esquemático de la placa secundaria, en esta ventana colocamos los componentes y realizamos las conexiones.

Los componentes utilizados fueron:

1. Conector Flat Hembra 10 pines: utilizado para establecer la conexión de la placa secundaria con la principal.
2. Molex 3 pines: utilizados para conectar las sondas de temperatura LM35.

Figura 17

Esquema en Proteus Profesional 8.8 de la placa secundaria (P1)



Nota. La placa secundaria corresponde al código P1 de los planos entregados. Fuente: propia.

Para el Layout de la placa secundaria que se muestra en la **Figura 18** se realizó el ruteo de las pistas, la comunicación entre la placa principal y la secundaria se realizó con un cable flat macho entres los dos conectores flat hembra de las placas.

El detalle de las conexiones entre el conector flat hembra y los molex se detallan en la **Tabla 26**.

Tabla 25

Detalle de Conexiones de Molex

Característica	Molex
GND [Pin 56]	3
VCC [Fuente de 5V]	1
Data	2

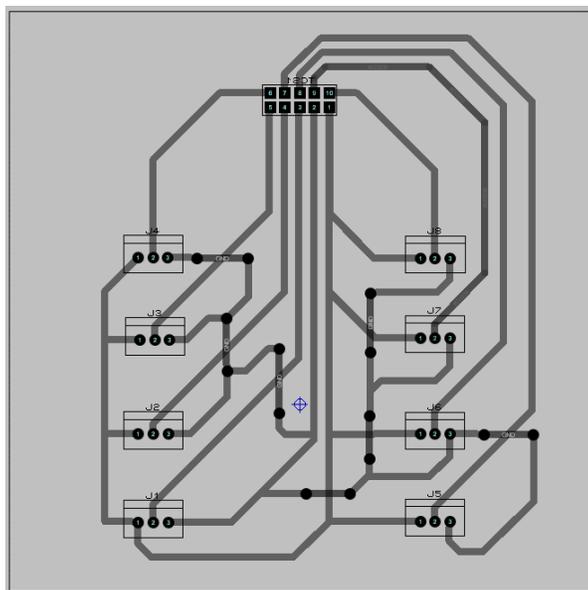
Tabla 26

Detalle de Conexiones entre Conector Flat Hembra y Molex

Conector Flat Hembra	Molex
1	VCC
2	GND
3	J1
4	J2
5	J3
6	J4
7	J5
8	J6
9	J7
10	J8

Figura 18

Layout de la placa secundaria



Diseño del sistema de control

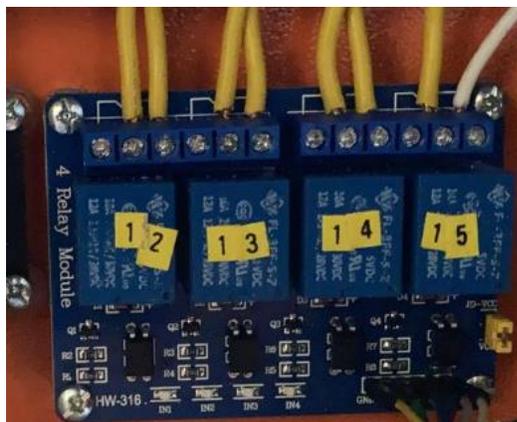
Relés de control

Un relé es un componente electromagnético cuyo funcionamiento es el de un interruptor que es controlado en un circuito eléctrico, el cuál por medio de una bobina y a su vez con un electroimán se accionan y uno o varios contactos se abre o se cierran dependiendo de la aplicación que se necesite.

En el túnel de aire multipropósito hay 4 resistencias a 220 V AC con un consumo de corriente de aproximadamente 5 A y un motor monofásico del compresor de la unidad de refrigeración a 120 V AC, estos equipos deben ser controlados desde el Arduino, sin embargo, las salidas digitales del Arduino son útiles para controlar cargas que no consuman una corriente elevada, siendo el caso de un led, pero quedan inservibles para cargas mayores como las de resistencias a 220 VAC o motores a 120 V AC, para esto existe un módulo de relés para Arduino que nos permite controlar cargas de fuerza, en este proyecto se usó un módulo de 4 relés marca TONGLING JQC-3FF-S-Z de 5 V DC / 10A 250 VAC / 15A 125 VAC / 10A 250 VAC como se muestra en la **Figura 19**, para controlar los 4 contactores de las resistencias de calentamiento y adicionalmente se usó un módulo individual de las mismas características para el control del contactor para el motor del compresor de la unidad de refrigeración.

Figura 19

Módulos de relés de control TONGLING



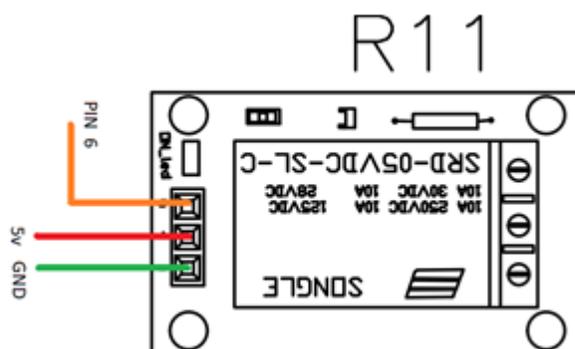
Nota. Los módulos de 4 relés se activan en LOW, mientras que el relé independiente se activa en HIGH. Fuente: propia.

Conexiones de los relés de control

Para el caso del relé independiente para el contactor de la unidad de refrigeración se debe realizar la conexión de la siguiente manera como se indica en la **Figura 20**.

Figura 20

Pines de conexión del relé independiente

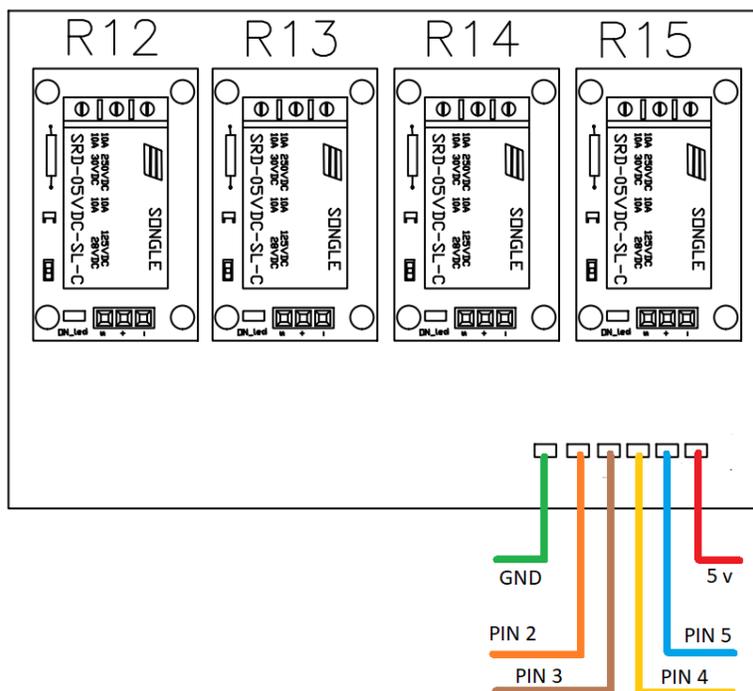


Nota. El relé individual tiene su salida de señal al Pin 6. Fuente: propia.

En el módulo de 4 relés para los contactores de las resistencias de calentamiento se tiene la siguiente conexión:

Figura 21

Pines de conexión del módulo de 4 relés



Como se puede observar en la **Figura 19**, la disposición de los relés de control en el armario eléctrico con su respectiva identificación, del lado izquierdo se encuentra el relé individual para el motor del compresor de la unidad de refrigeración y del lado derecho se encuentra el módulo de 4 relés para las resistencias de calentamiento.

Y en la **Tabla 27** se puede observar la nomenclatura usada en los relés de control, tanto el relé independiente para el motor del compresor y el módulo de 4 relés TONGLING para las resistencias.

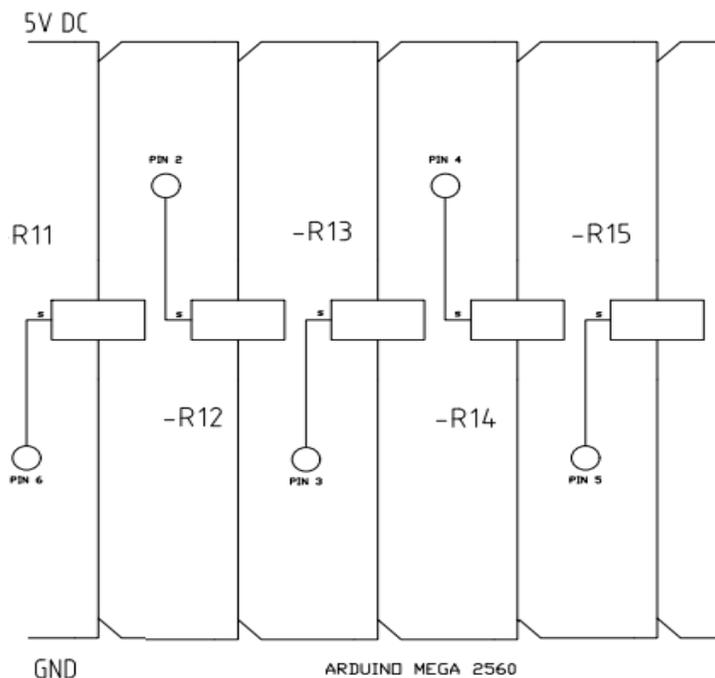
Tabla 27*Identificación de los relés de control*

Símbolo	Especificación
R11	Relé del motor del compresor
R12	Relé de resistencia 1
R13	Relé de resistencia 2
R14	Relé de resistencia 3
R15	Relé de resistencia 4

Los relés de control tienen 3 contactos en la parte de fuerza, un contacto normalmente abierto (NO), normalmente cerrado (NC) y un COM, como se observa en la **Figura 22** se establecen las conexiones que se deben realizar, se toma la fase de una fuente de alimentación de 110 V AC, que va directamente a los contactos COM, de los NO se conecta al A1 de las bobinas de los contactores de fuerza Q, y del A2 de las bobinas se conectan al neutro de la fuente de alimentación de 110 VAC. El lote XD1 es una bornera que nos sirve para puentear las fases a los contactos COM.

Figura 23

Circuito de control de los relés TONGLING



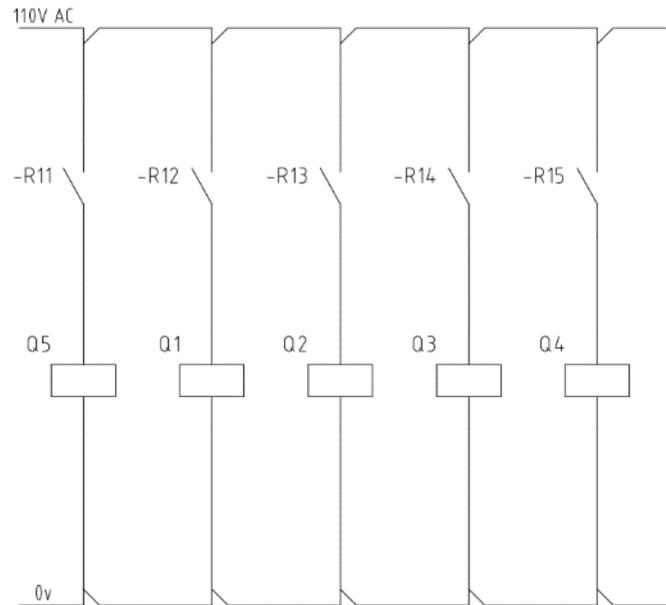
Nota. En el gráfico se puede observar el circuito de control de los relés de control, cada relé tiene su entrada digital, R11- PIN 6, R12- PIN 2, R13- PIN 3, R14- PIN 4, R15- PIN-5.

Fuente: Propia.

Adicionalmente, en la parte de control también interviene las bobinas de los contactores, en la **Figura 24**, se muestra el circuito de control de los actuadores de fuerza, el momento que se energiza los relés de control, estos cierran sus contactos normalmente abiertos y permiten que se energicen las bobinas de los contactores Q.

Figura 24

Circuito de control de los actuadores de fuerza EBASEE



Nota. En el gráfico se puede observar el circuito de control de los actuadores de fuerza, cada relé al cerrar sus contactos energiza las bobinas de los contactores Q1, Q2, Q3, Q4, Q5. Fuente: Propia.

Diseño del sistema de fuerza

Actuadores de fuerza

Es un dispositivo eléctrico de mando a distancia, dispone de interruptores electromagnéticos para abrir o cerrar circuitos de fuerza con elevada tensión y corriente, para este proyecto se usó contactores de la marca EBASEE modelo EBSK1 IEC/EN60947 -4 -1 / 690V / 8A / 60Hz, se usaron 5 contactores en total, para las 4 resistencias de calentamiento y para el motor del compresor de la unidad de refrigeración, la codificación de cada contactor se encuentra en la **Tabla 28**.

Figura 25

Disposición de los contactores en el tablero eléctrico con su codificación

**Tabla 28**

Identificación de los actuadores de fuerza

Símbolo	Especificación
Q5	Contactador del motor del compresor
Q1	Contactador de resistencia 1
Q2	Contactador de resistencia 2
Q3	Contactador de resistencia 3
Q4	Contactador de resistencia 4

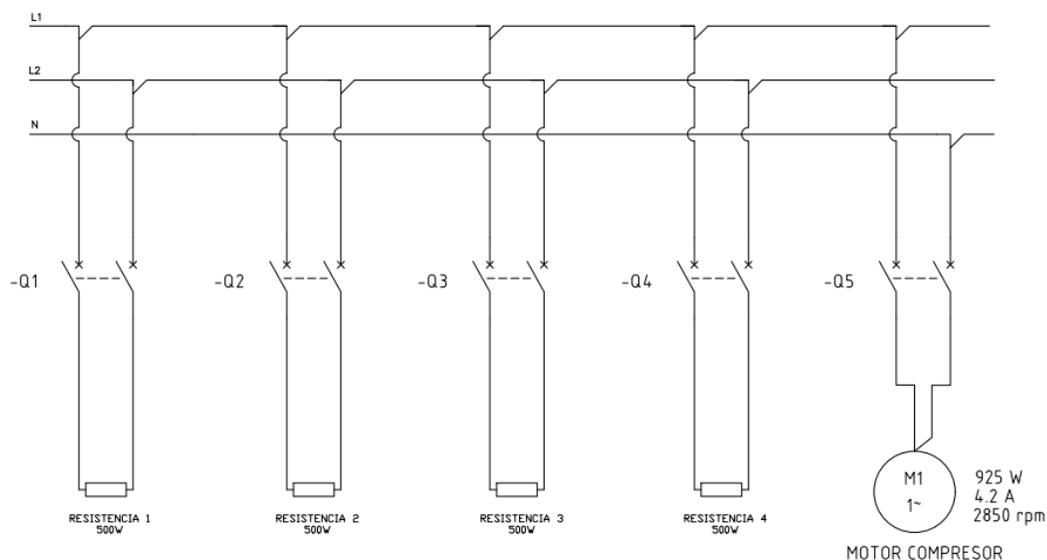
Diagramas de fuerza

Los diagramas de fuerza nos permiten visualizar como están conectados cargas, los voltajes que se manejan en la instalación, la codificación, las características de los dispositivos usados, entre otros. En la **Figura 26**, observamos que tenemos una red bifásica L1 y L2 a 220 V AC, las 4 resistencias funcionan a 220 V AC en dos fases, como se observa está conectado a L1 y L2 de los contactores Q1, Q2, Q3, Q4 de cada resistencia, sin embargo, el motor monofásico del

compresor de la unidad de refrigeración funciona a 110 V AC, y se toma L1 y la fase de N para los contactos L1 y L2 del contactor Q5.

Figura 26

Diagrama de fuerza



Diagramas de las fuentes de alimentación

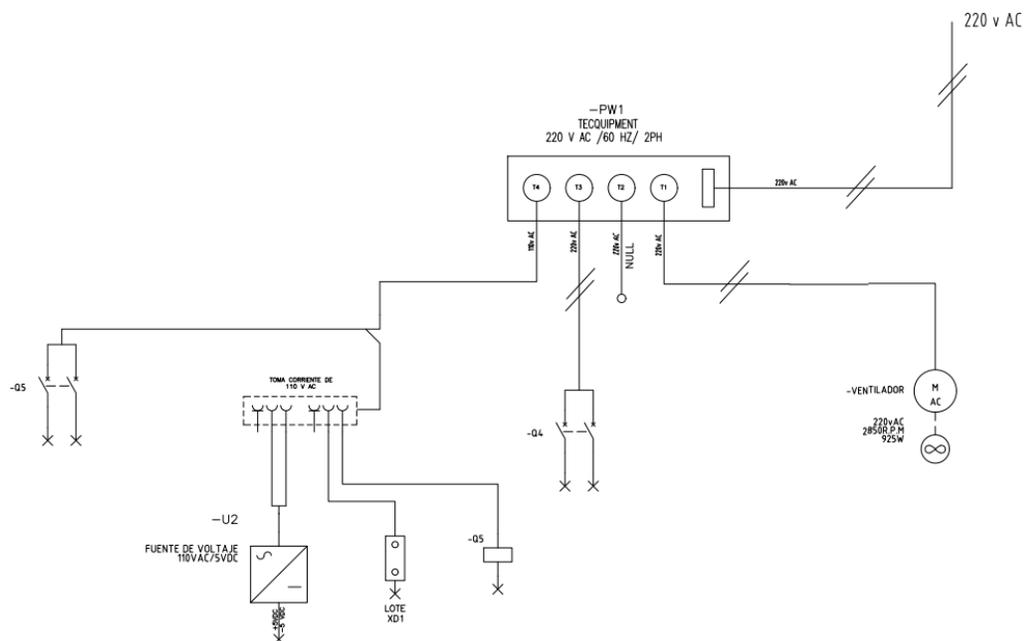
El túnel de aire multipropósito contiene una fuente de distribución de voltaje PW1, a donde llega un voltaje de 220 V AC bifásico, a su vez este tiene un interruptor que activa 4 tomacorrientes, T1, T2, T3, T4, de los cuales T1, T2, T3 son a 220 V AC bifásico y T4 es a 110 V AC monofásico como se indica en la **Figura 27**, T1 se usa para encender el motor del ventilador, T2 está libre y se lo puede usar para conectar un segundo ventilador, en el caso de ser necesario, T3 se usa para las resistencias de calentamiento, y está conectado a L1 y L2 del contactor Q4 correspondiente a la resistencia 4, y se puentea con los demás contactores.

T4 se usa para alimentar el tomacorriente de 110 V AC en la parte interna del armario eléctrico, en el tomacorriente U1 la fase alimenta el lote XD1 que se usa para distribuir el voltaje en los puntos COM de los relés de control, mientras que el neutro se usa para el cerrar el

circuito de la bobina del contactor Q5, y este está puentado con las bobinas de Q1, Q2, Q3, Q4, esto se representa en la **Figura 22**.

Figura 27

Fuente de alimentación PW1 Tecquipment 220 V AC / 60 Hz / 2PH



Diseño del armario eléctrico

Cuando se usa en una instalación eléctrica elementos como contactores, relés térmicos, PLC's, guarda motores, variadores de frecuencia, etc., estos deben colocarse en un tablero o armario, para este proyecto se adquirió un tablero NEMA12, equivalente a un IP52 de 40 x 30 x 15 mm, de acero de 2 mm de espesor con doble fondo, además se usó una canaleta Dexson de 25.4 x 25.4 mm para colocar los cables en la parte interna del tablero.

Figura 28

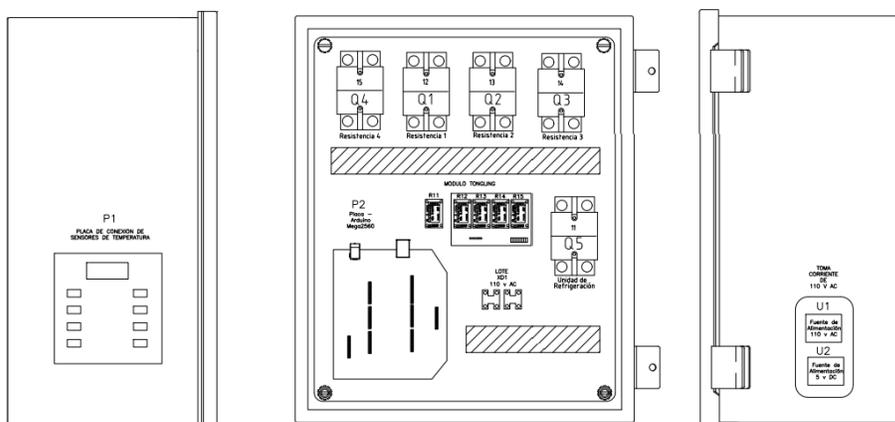
Armario eléctrico 40x30x15 mm



Para la selección del tamaño del armario se realizó un plano en AutoCAD Electrical 2020, en la **Figura 28** se observa el armario eléctrico seleccionado y en la **Figura 29** se observa el plano de diseño del armario, en el cual constan todos los elementos detallados en la **Tabla 29**.

Figura 29

Diseño del armario eléctrico en AutoCAD Electrical 2020



Nota. La toma corriente de 110 V AC se encuentra en la parte interna del armario eléctrico. Fuente: Propia.

Figura 30*Diseño del armario eléctrico final***Tabla 29***Listado de componentes del armario eléctrico*

Código	Componente
U1	Fuente de alimentación de 110 V AC (Unidad de refrigeración y Modulo TONGLING)
U2	Fuente de alimentación para el Arduino
P1	Placa de conexión de sensores de temperatura
P2	Placa madre para Microcontrolador Arduino
Módulo TONGLING	Relés de control JQC-3FF-S-Z
LOTE XD1	Bornera 110 V AC
Q	Contactores para resistencias y motor

Instrumentación

En este proyecto se usaron dispositivos para la medición de temperatura en diferentes puntos en los intercambiadores de calor de tubos lisos y con aletas, la unidad de refrigeración, en las entradas y salidas del aire, adicionalmente se colocó un sensor de presión a la entrada del túnel de aire, esto con la finalidad de obtener la presión de entrada al ducto y compararla con lo que nos proporciona el manual para determinar la velocidad de entrada del aire.

Sondas de temperatura LM35

El sensor LM35 es un dispositivo medición de temperatura con un circuito integrado de precisión que tiene una resolución de 10 mV por cada $^{\circ}\text{C}$, el sensor de la serie LM35 usado en este proyecto es el indicado en la **Figura 31**, tipo sonda sumergible, todas las características técnicas del sensor se encuentran en la **Tabla 30**.

Figura 31

Sonda de Temperatura LM35



Tabla 30

Características técnicas de la sonda LM35 tipo sumergible

Característica	Especificación
Resolución	10 mV por cada °C
V. Alimentación	3.0 – 5.0 V DC
Señal de salida	Analógica
Número de pines	3 pines, Rojo (VDD), Amarillo (DATA), Negro (GND)
Rango de funcionamiento	–50 °C – 150 °C
Modo de transmisión de datos	9-12 resolución ajustable
Longitud cable	1 m
Dimensiones de la carcasa de acero inoxidable	∅6 × 50mm

Para usar este sensor en el LabView, se establece la siguiente característica estática:

$$^{\circ}\text{C} = V_{\text{salida}} \times 100 \quad (26)$$

En la **Figura 32** se observa cómo se debe proceder a ingresar la característica estática en el LabView.

Figura 32

Ingreso de la característica estática del sensor LM35 en el diagrama de bloque en LabView

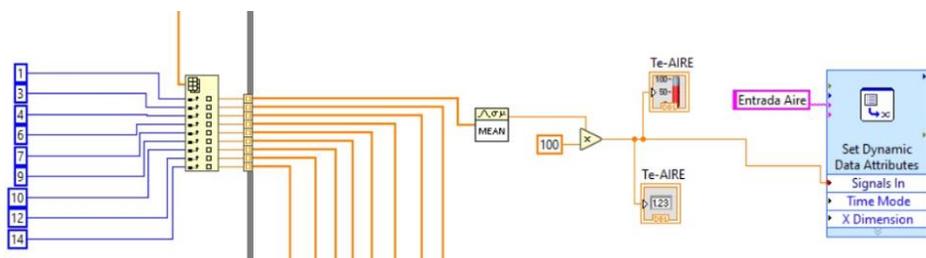


Figura 34

Ingreso de la característica estática del sensor MPX5010 en el diagrama de bloque en LabView

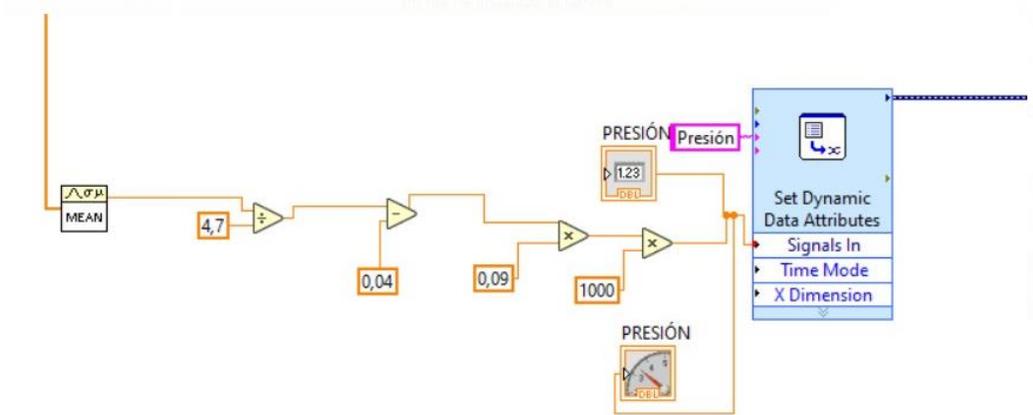


Tabla 31

Valores de presión a la entrada del ducto en función de la velocidad del aire

Velocidad $\left(\frac{m}{s}\right)$	Presión $\left(\frac{N}{m^2}\right)$
1	0.6
1.5	1.35
2	2.40
3	5.40
4	9.60
5	15.00
10	60.00
15	135.00
20	240.00

Nota. El manual del equipo nos muestra una tabla de velocidades en función de la presión, para la situación en que no se tenga con que medir la velocidad en el ducto, se puede usar esta tabla.

Análisis de los sensores de temperatura LM35

Se consideró importante realizar un análisis estadístico descriptivo del comportamiento de los sensores de temperatura LM35, que serán usados para este trabajo de titulación, se tomarán 10 datos de temperatura de los 10 sensores que se tienen instalados en el equipo, los datos obtenidos de los sensores principales se muestran en la **Tabla 32**, mientras que en la **Tabla 33** se muestran las secundarias.

Tabla 32

Análisis estadístico descriptivo de los sensores de temperatura LM35, PRINCIPALES

	$T_{e_{aire}}$	$T_{s_{aire}}$	Tubos lisos		Tubos con aletas	
			$T_{e_{agua1}}$	$T_{s_{agua1}}$	$T_{e_{agua2}}$	$T_{s_{agua2}}$
h1	21.96	21.87	22.08	22.14	22.09	21.95
h2	21.91	21.90	22.01	22.13	22.01	21.89
h3	21.97	21.92	22.03	22.08	22.03	21.96
h4	21.98	22.11	21.98	22.18	22.06	22.07
h5	22.02	22.16	21.98	22.27	22.00	21.97
h6	21.94	22.17	22.00	22.12	22.12	22.12
h7	22.02	22.07	21.95	22.18	22.07	22.02
h8	21.97	22.12	22.00	22.23	22.11	22.03
h9	22.03	22.17	22.03	22.24	22.05	21.97
h10	22.08	22.18	22.02	22.17	22.04	21.84

Tabla 33*Análisis estadístico descriptivo de los sensores de temperatura LM35, SECUNDARIAS*

	Tubos lisos		Tubos con aletas	
	Ti_1	Ti_2	Ti_1	Ti_2
h1	22.08	22.12	22.04	22.08
h2	22.06	22.05	22.08	22.06
h3	21.98	22.06	22.02	22.00
h4	22.08	22.10	22.04	21.96
h5	22.00	22.06	22.06	21.98
h6	21.94	22.00	22.00	22.00
h7	22.06	22.04	22.06	22.06
h8	22.04	22.06	22.08	21.98
h9	22.02	21.98	21.98	21.98
h10	22.10	21.97	21.96	22.06

Tabla 34*Análisis estadístico de temperaturas tomadas con los sensores LM35*

Temperaturas	
Media \bar{x}	22.040
Rango	0.252
Mediana	22.038
Desviación Típica	0.0790
No. Datos	100
Valor máx.	22.270
Valor min.	21.840
No. Intervalos	7.644
Amplitud clase	0.056

Tabla 35

Tabla de distribución de frecuencias

Intervalos de clase		Marca de clase	fi	Fi	hi%	Hi%
Lim. Inf.	Lim. sup	\bar{x}				
21,840	21,896	21,868	3	3	3,00%	3,00%
21,896	21,953	21,924	7	10	7,00%	10,00%
21,953	22,009	21,981	26	36	26,00%	36,00%
22,009	22,065	22,037	31	67	31,00%	67,00%
22,065	22,121	22,093	21	88	21,00%	88,00%
22,121	22,178	22,149	6	94	6,00%	94,00%
22,178	22,234	22,206	4	98	4,00%	98,00%
22,234	22,290	22,262	2	100	2,00%	100,00%
			100		100%	

Figura 35

Distribución de frecuencias

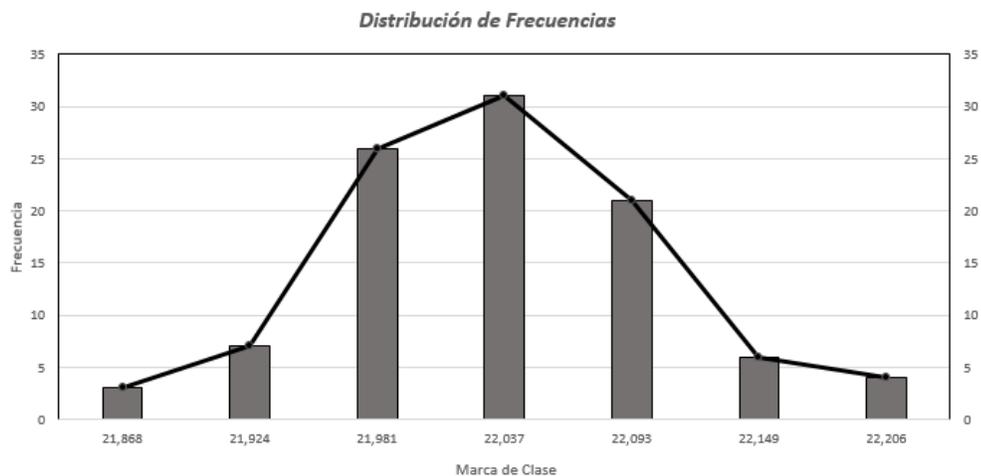
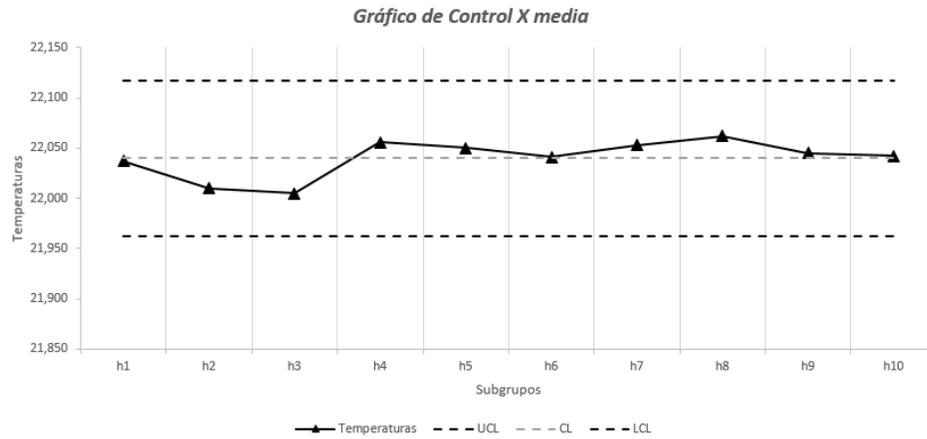


Figura 36

Gráfica de control X-barra



Como podemos observar en la **Figura 36**, el proceso está bajo control y podemos concluir que los datos de los sensores de temperatura tomados son confiables, ya que las medias encontradas están entre los límites UCL (Upper control limit) y LCL (lower control limit).

Capítulo V Diseño del human machine interface (HMI)

Interfaz HMI – Front Panel

Pantalla Principal

En el MENÚ del HMI [Human Machine Interface], tenemos tres opciones disponibles:

- Módulo Intercambiador de Calor de Tubos Lisos
- Módulo Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas
- Módulo Evaporador y Unidad de Refrigeración.
- El botón STOP cerrará el MENÚ.

Figura 37

Menú principal del HMI



Pantalla Secundaria

Tomando como ejemplo para el módulo de intercambiador de calor de tubos lisos, en la pantalla del HMI tenemos los siguientes botones que se muestran en la **Figura 38**.

Figura 38

Botones usados en el HMI para el intercambiador de tubos lisos

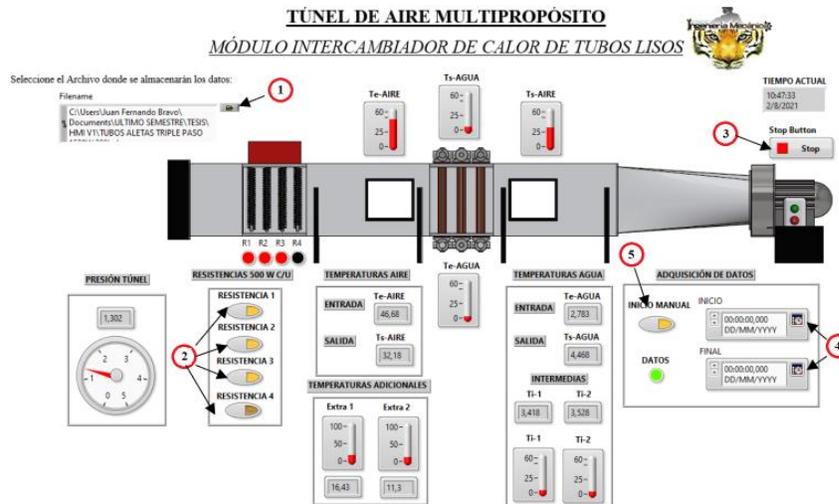
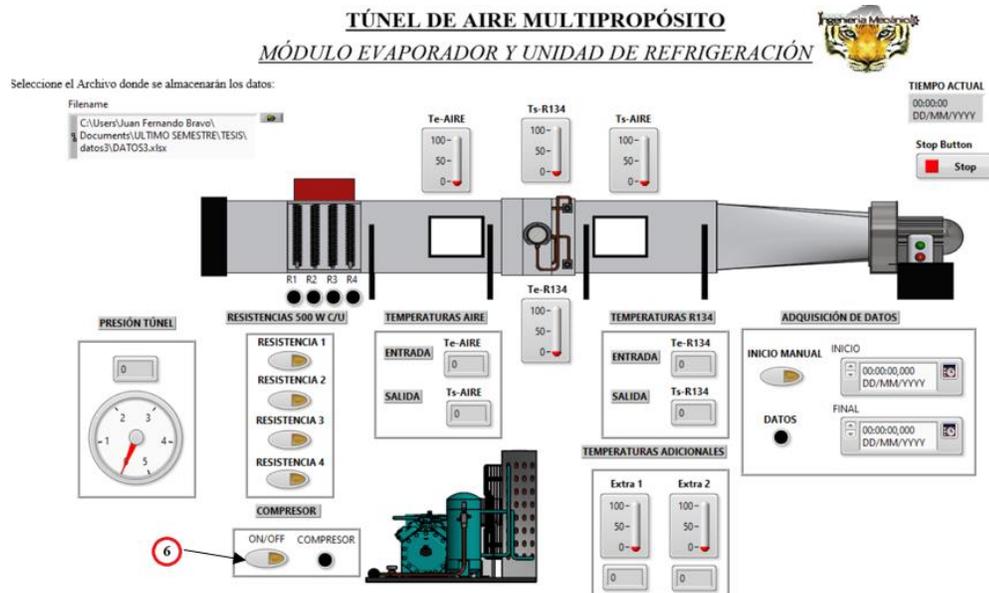


Figura 39

Botones usados en el HMI para la unidad de refrigeración



Nota. Los botones son los mismos que en la **Figura 38**, solo se aumenta el botón para encender el compresor. Fuente: propia.

Botones:

1. Selección de Archivo: permite al usuario escoger un documento de Excel, en cual se guardarán los datos tomados durante la práctica de laboratorio.
2. Resistencias: permite al usuario encender individualmente las resistencias eléctricas disponibles, cada resistencia tiene una potencia de 500 W, dando una potencia combinada de 2000W.
3. Stop: detiene el programa automáticamente.
 - a. Nota: al detener el programa los datos tomados si permanecen guardados en el archivo de Excel seleccionado.
4. Selección de lapso: permite al usuario escoger una fecha y hora de inicio y fin de adquisición de datos.
5. Inicio manual: permite al usuario iniciar y finalizar la adquisición de datos manualmente.
6. Compresor ON/OFF: permite al usuario encender y apagar el compresor de la unidad de refrigeración.

En la **Figura 40** se muestran de forma digital las siguientes temperaturas de intercambiador de agua:

- a. Te-Agua: Entrada de Agua
- b. Ts-Agua: Salida de Agua
- c. Ti-1: Temperatura Intermedia 1 [Primer Paso por el Intercambiador de Calor]
- d. Ti-2: Temperatura Intermedia 2 [Segundo Paso por el Intercambiador de Calor]

Figura 40

Sección para la toma de datos del agua

TEMPERATURAS AGUA

ENTRADA Te-AGUA
0

SALIDA Ts-AGUA
0

INTERMEDIAS

Ti-1 Ti-2
0 0

Ti-1 Ti-2
100- 100-
50- 50-
0- 0-

En la **Figura 41** se muestran de forma digital las siguientes temperaturas del aire:

- Te-Aire: Entrada de Aire
- Ts-Aire: Salida de Aire

Figura 41

Sección para la toma de datos del aire

TEMPERATURAS AIRE

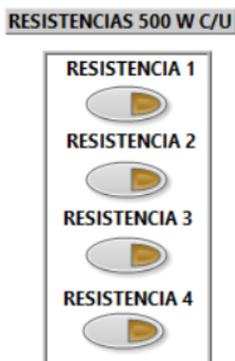
ENTRADA Te-AIRE
0

SALIDA Ts-AIRE
0

En la **Figura 42** se muestran 4 botones pertenecientes a las 4 resistencias disponibles en el equipo. Cada resistencia tiene una potencia de 500W.

Figura 42

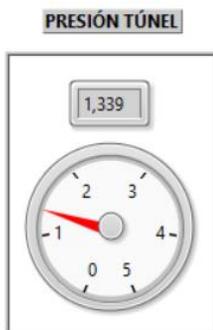
Sección para el encendido de las resistencias eléctricas



En la **Figura 43** se muestra la presión diferencial entre el interior del túnel de aire y la presión atmosférica.

Figura 43

Sección para la toma de datos de presión



En la **Figura 44** la sección para la toma de datos programados tiene disponibles dos maneras de tomar los datos:

- Manual: Se debe dar clic sobre el botón de INICIO MANUAL

- Automática: Se selecciona fecha y hora en el bloque de INICIO, de igual manera en el bloque FINAL, para determinar el intervalo de toma de datos.

Figura 44

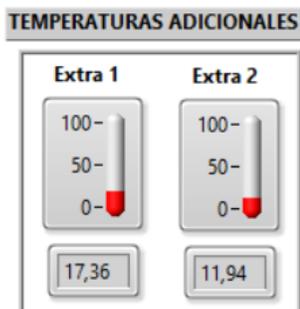
Sección para la toma de datos programadas



En la **Figura 45** se muestran dos puertos disponibles para la toma de datos adicionales que se requieran para adaptaciones, como temperatura ambiente.

Figura 45

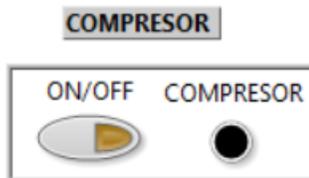
Sección para la toma de temperaturas adicionales



En la **Figura 46** la sección que se muestra se usa para encender y apagar el compresor de la unidad de refrigeración.

Figura 46

Sección para el encendido y apagado del compresor de la unidad de refrigeración



En la **Figura 47** se muestra la sección para la toma de datos de entrada y salida del refrigerante del evaporador.

Figura 47

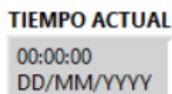
Sección para la toma de temperaturas de la unidad de refrigeración



En la **Figura 48** la sección muestra la fecha y la hora del día en el que se está realizando la práctica.

Figura 48

Sección para el tiempo actual

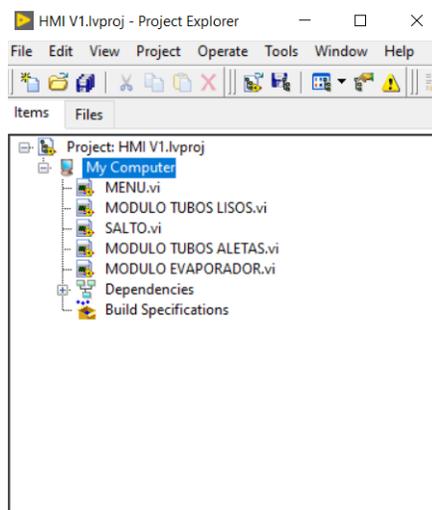


Programación HMI – Block Diagram

Para la realización de la programación se utilizó el software LabView 2020, que permite crear una interfaz con la que el usuario puede interactuar; el tipo de programación que utiliza este software es de bloques.

Figura 49

Archivo del proyecto del HMI



El proyecto creado (HMI V1) consta de 5 VI's individuales los cuales se detallan a continuación:

a. MENU.vi

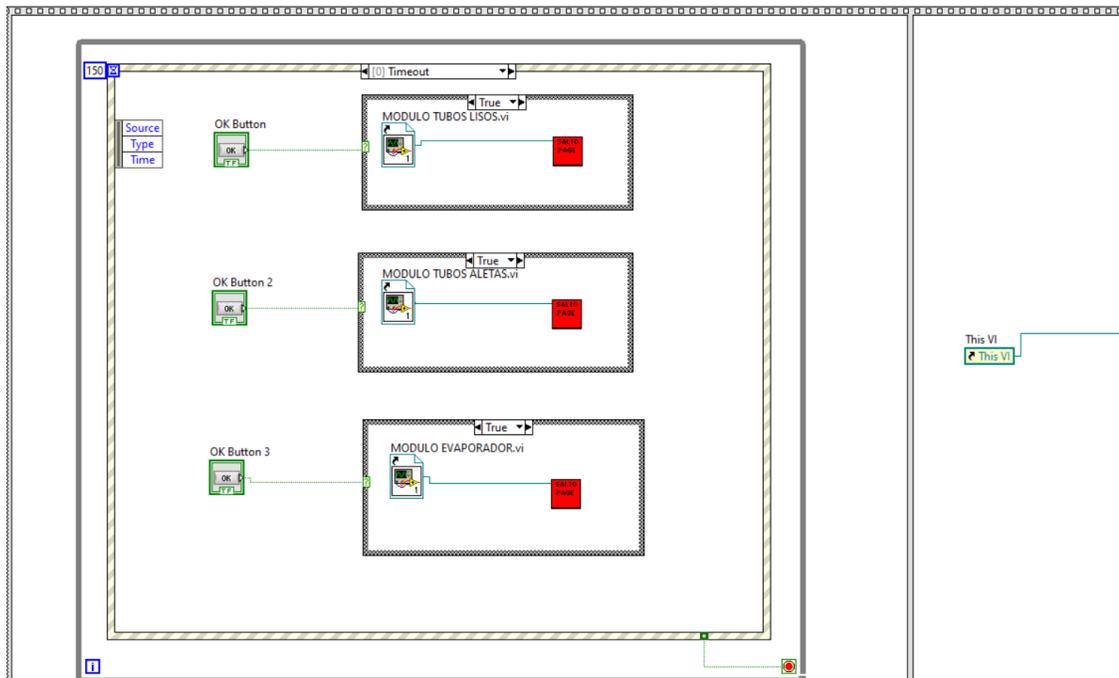
En la **Figura 50** se muestra el diagrama de bloques con el código del MENU.vi, consta de los siguientes bloques y estructuras en orden de ejecución:

1. Inicialmente y encerrando todo código tenemos una Flat Sequence Structure que nos permite tener uno o más pestañas o sub-diagramas los cuales se ejecutan, nos garantiza que cada una de estas pestañas se ejecuten una después de otra. En la primera ventana se tiene los botones booleanos que nos permiten elegir entre los tres módulos disponibles; mientras que en la segunda cerramos el Front Panel del VI.

2. Dentro de la estructura anterior tenemos un While Loop, que nos permite ejecutar una acción hasta que una condición específica ocurra, para este caso hasta que se presione el botón STOP.
3. Dentro del ciclo While tenemos una Event Structure, la cual espera hasta que un evento ocurra para ejecutar una acción, en este caso tenemos 3, en el primer evento "Timeout" tenemos los bloques correspondientes a los tres módulos disponibles en el túnel de aire.
4. Dentro de la Event Structure tenemos tres botones booleanos y tres Case Structures, las cuales se activarán si el booleano es True, en caso de activarse se abrirá el VI seleccionado con el bloque Static VI Reference y la función SALTO.

Figura 50

Diagrama de bloques con el código del MENU.vi



En la **Figura 51** tenemos el evento “Panel Close” de la Event Structure, el cual descartamos y se ejecuta el tercer y en la **Figura 52** se presenta el último evento “Stop Value Change”, el cual nos permite detener la ejecución del VI y por ende salir del ciclo While para continuar con la ventana siguiente de la Flat Sequence que cierra el Front Panel.

Figura 51

Evento “Panel Close” de la Event Structure

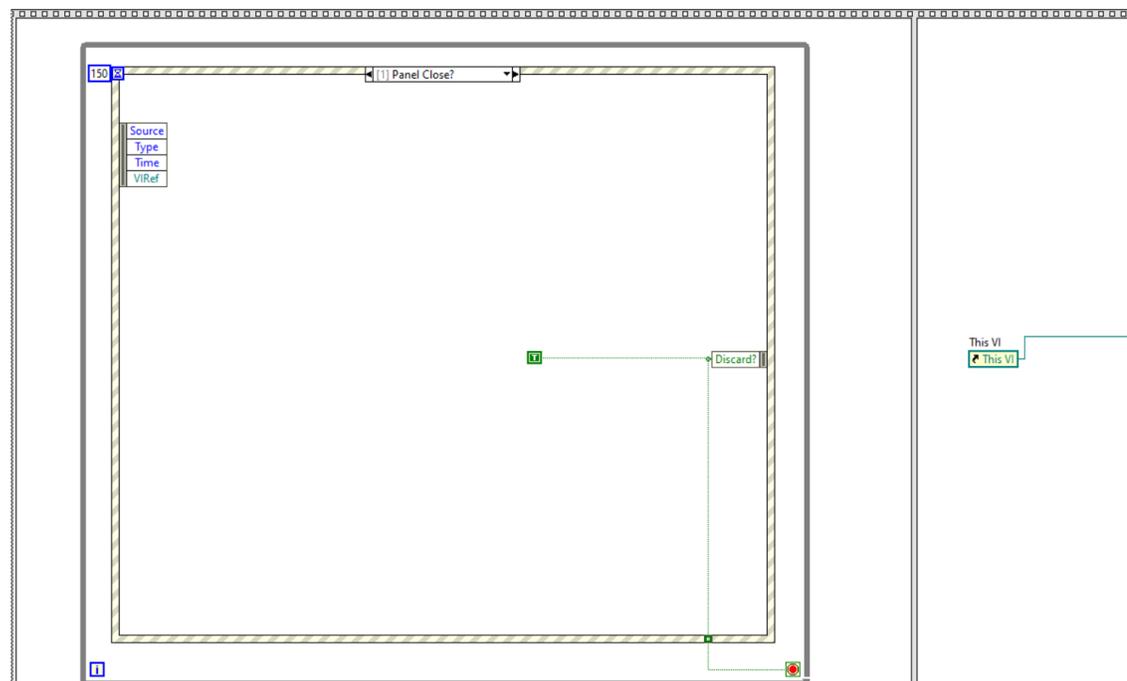
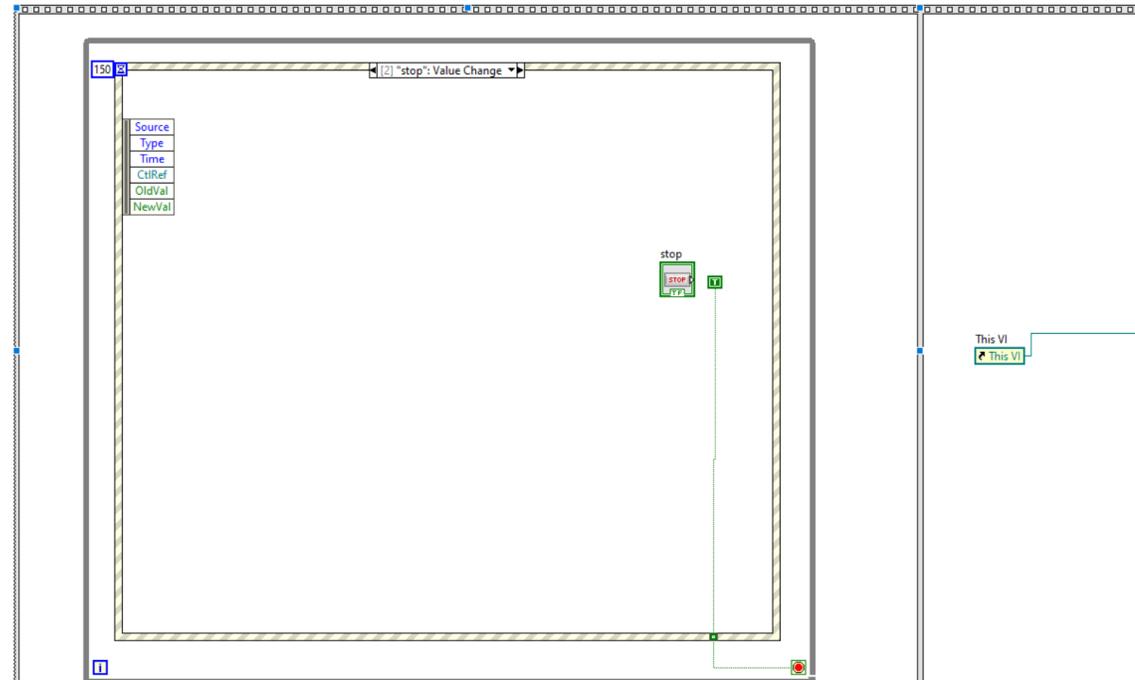


Figura 52

Evento "Stop Value Change"



b. MODULO TUBOS LISOS.vi y MODULO TUBOS ALETAS.vi

Para estos dos VI's la programación es la misma ya que se trata de dos prácticas de laboratorio similares cambiando únicamente en el módulo utilizado, las tomas de temperatura y presión en ambos módulos son las mismas al igual que la activación de las cuatro resistencias disponibles para calentar el aire.

Para la comunicación con nuestro dispositivo de adquisición de datos, es decir el Arduino Mega2560 se utilizó la librería LINX de LabView, la cual consta de todo un grupo de bloques que facilitan la conexión y manipulación de la información proporcionada por el Arduino.

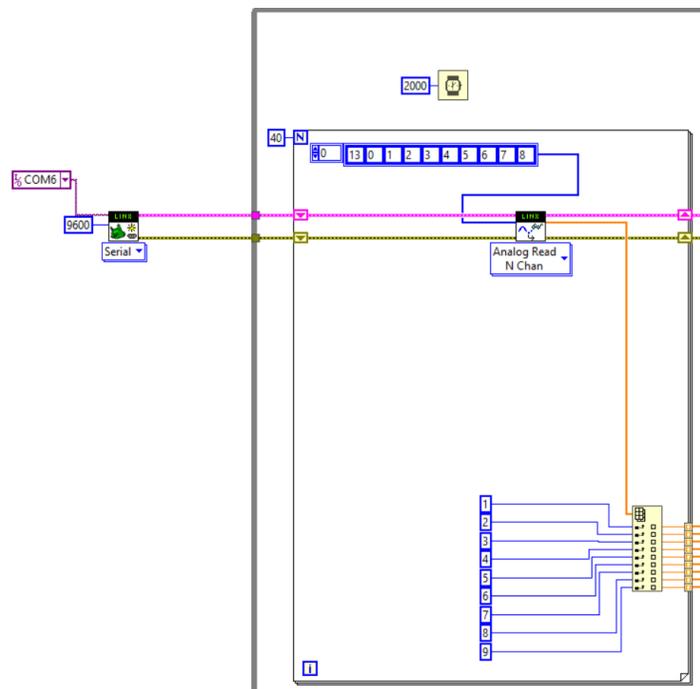
Para este caso usaremos el MODULO TUBOS ALETAS.vi como ejemplo de la programación realizada. En la **Figura 53** se muestra una sección del diagrama de bloques con el código del VI antes mencionado, consta de los siguientes bloques y estructuras:

1. Inicialmente y fuera del While Loop tenemos el bloque Open VI de la librería LINX de LabView, el cual establece la comunicación Serial con el dispositivo de adquisición de datos, además se proporciona la tasa de baudios (9600) y se conectan los nodos de LINX Resource y Error Out, que proporciona la comunicación que viene del Arduino y el error (en caso de existirlo) respectivamente.
2. Encerrando a todo el código tenemos un While Loop que ejecuta el VI hasta la ocurrencia de una condición específica, en este caso existen dos formas, una es el botón STOP y otra es el botón Abort Execution; además tenemos el bloque Wait que espera la cantidad de milisegundos especificada para ejecutar todo lo que este en el ciclo While, para este caso 2000ms y finalmente tenemos el bloque Get Date/Time que nos muestra el tiempo real.
3. Dentro del While Loop tenemos un For Loop que ejecuta n número de iteraciones, para este caso 40 iteraciones, dentro del For Loop tenemos el bloque Analog Read configurado para N canales de la librería LINX, dicho bloque tiene conectado los nodos de Linx Resource y Error In.
4. Después se crea un Array conectado a la entrada Channels donde establecemos los pines analógicos del Arduino de los cuales estamos obteniendo la información de los sensores, posteriormente se conecta el nodo Voltages al bloque Index Array el cual recibe el tamaño del arreglo y nos permite con el uso de índices manipular el arreglo o en este caso las señales analógicas provenientes de los pines del Arduino.

- Finalmente, todas las señales analógicas salen del bloque Index Array y se conectan al borde del For Loop en el cual se establece el modo Indexing del Tunel Mode que guarda cada dato tomado (40 veces) en un arreglo individual perteneciente a cada una de las señales, el propósito de este algoritmo es posteriormente promediar los datos obtenidos con el fin de reducir el error de las sondas de temperatura.

Figura 53

Diagrama de bloques para sensores analógicos



En la **Figura 54** se observa la continuación de la programación de la **Figura 53** en esta sección se realizan las siguientes acciones:

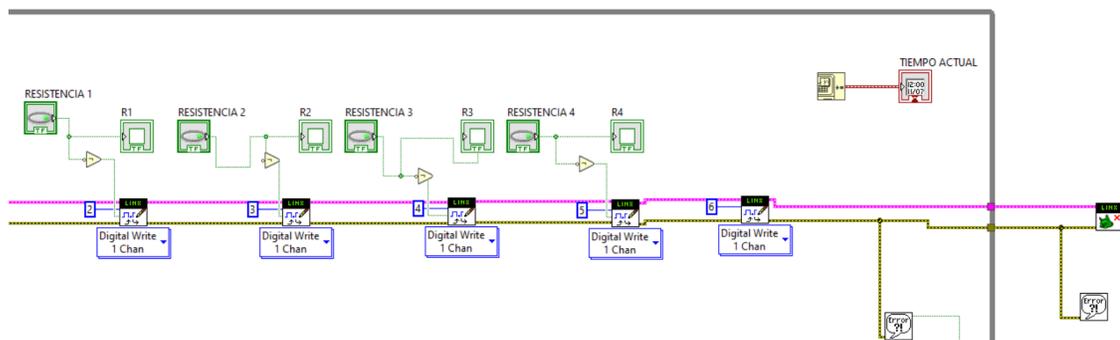
- A la salida del ciclo For tenemos cinco bloques Digital Write configurados para 1 canal, los cuales tienen conectados en serie los nodos de Linx Resource y Error; además establecemos los pines digitales a los que enviaremos la señal de activación (HIGH o

LOW); posteriormente usamos bloques controladores booleanos para enviar la señal y activar en este caso las resistencias del túnel de aire y los indicador booleano o LEDs del Front Panel. *Nota:* el módulo de relés utilizados tiene la característica de encenderse en baja, es decir LOW, por ello después del controlador booleano tenemos la negación NOT.

2. A la salida del último bloque Digital Write tenemos conectado el bloque Simple Error que nos entrega un mensaje en caso de la ocurrencia de un error.

Figura 54

Diagrama de bloques para los sensores digitales



En la **Figura 55** se observa la continuación de la programación en esta sección se ejecutan las siguientes acciones:

1. Al completar las iteraciones del For Loop tenemos las 9 señales analógicas que serán promediadas gracias al bloque Mean que calcula la media de los valores ingresados.
2. Posteriormente la señal promediada es multiplicada por 100 para el caso de las sondas de temperatura ya que tienen una apreciación de 10 mV/oC y para el caso del sensor de

presión se realizan las operaciones observadas en la **Figura 56** que corresponden a la característica estática proporcionada por el datasheet.

- Una vez realizadas las respectivas operaciones de manipulación de señal los resultados son reflejados en los bloques Numeric Indicator y Thermometer para las sondas de temperatura; para el caso de la presión se reflejan en el bloque Numeric Indicator y Gauge.
- La misma señal se conecta a la entrada de señales Signals In del bloque Set Dynamic Data Attributes, el cual permite manipular los atributos de una señal, para este caso se renombraron todas las señales analógicas con el fin de identificarlas.

Figura 55

Ingreso de la característica estática de los sensores de temperatura LM35

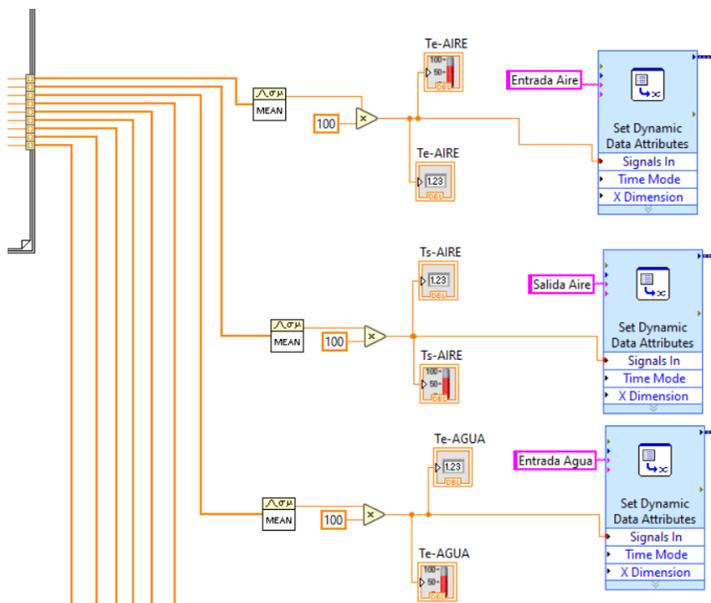
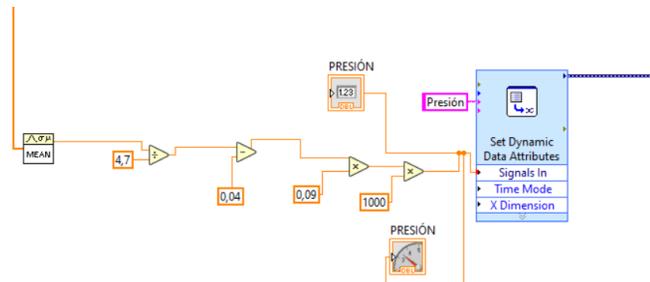


Figura 56

Ingreso de la característica estática del sensor de presión

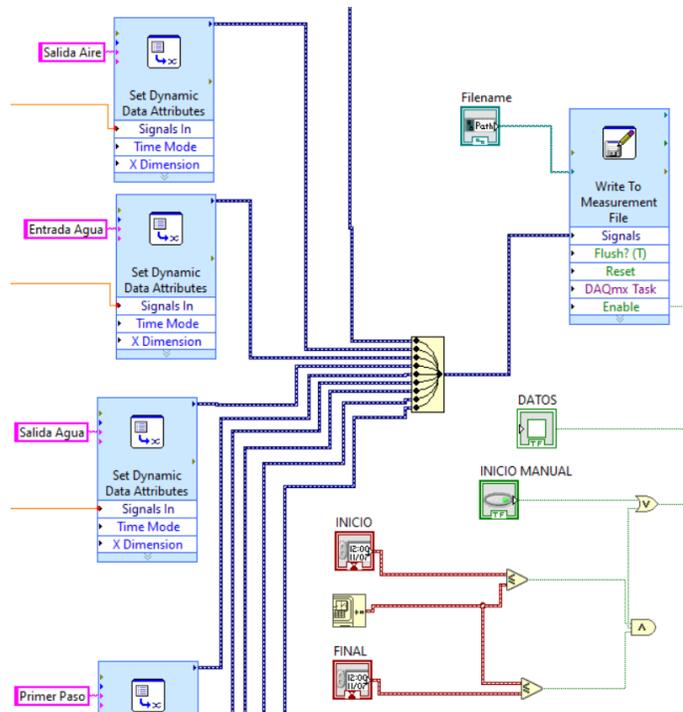


En la **Figura 57** se observa la continuación de la programación en esta sección se ejecutan las siguientes acciones:

1. Todas las salidas de los bloques Set Dynamic Data Attributes se conectan al bloque Merge Signals, que fusiona todas las señales que sean compatibles entre sí.
2. La salida del bloque Merge Signals se conecta a la entrada Signals del bloque Write to Measurement File, el cual escribe los datos tomados en archivos de texto, binarios y Excel, siendo el último el archivo elegido para almacenar los datos.
3. Para iniciar la adquisición de datos se disponen de dos opciones conectadas a la entrada Enable; la primera de ellas es activando el controlador booleano el cual iniciará la adquisición de datos y encenderá el LED indicador; la segunda es para tomar datos en un lapso de tiempo para ello se tienen dos bloques Time Stamp uno de inicio y otro de final, ambos comparados con el bloque Get Date, en caso de cumplir con ambas condiciones se iniciará la adquisición de datos.

Figura 57

Conexión entre el bloque Set Dynamic Data Attributes al bloque Merge Signals



c. SALTO.vi

En la **Figura 58** se muestra el diagrama de bloques con el código del SALTO.vi, consta de los siguientes bloques y estructuras en orden de ejecución:

1. Inicialmente usamos el bloque Invoke Node, que permite invocar un método o una acción sobre una referencia, en este caso nuestra referencia es un controlador que selecciona entre los tres VI's correspondientes a los tres módulos disponibles; el método seleccionado es "FP Open" que abre el Front Panel de la referencia seleccionada gracias al booleano True en Activate.

2. Después unimos los nodos de referencia [verde] y la salida del error [amarilla] a el bloque Property Node el cual establece propiedades de una referencia, para este caso se escogió la propiedad Execution Estate que indica el estado de ejecución del VI y se hace una comparación Not Equal con Run Top Level (jerarquía activa) que tiene un valor de 2.
3. De ser True la comparación se ejecuta el caso True de la Case Structure la cual contiene el bloque Invoke Node con los nodos de referencia y error conectados, el método utilizado en este caso es "Run VI" que ejecuta el VI perteneciente a la referencia seleccionada.

La función SALTO.vi es llamada en el MENU.vi para abrir cada uno de los 3 VI's

pertenecientes a:

- Módulo Intercambiador de Calor de Tubos Lisos
- Módulo Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas
- Módulo Evaporador y Unidad de Refrigeración.

Figura 58

Diagrama de bloques con el código SALTO.vi

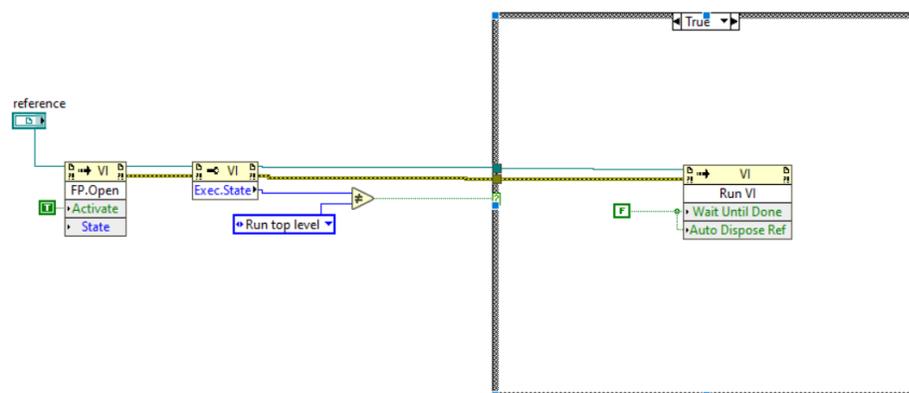
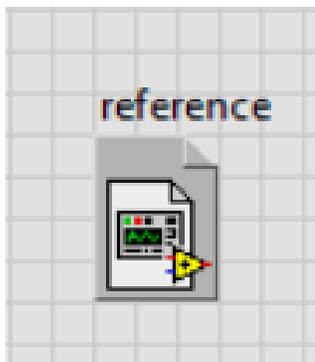
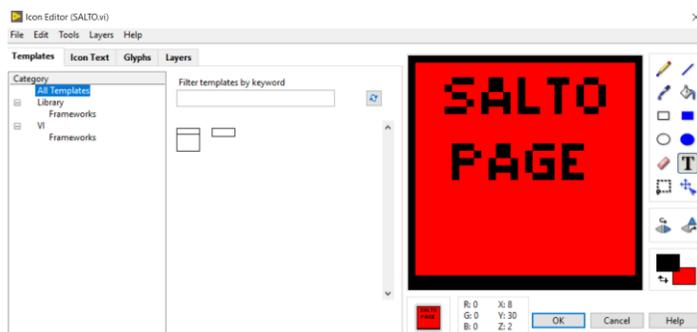


Figura 59*Referencia al Front Panel***Figura 60***Editor de íconos***d. MODULO EVAPORADOR.vi**

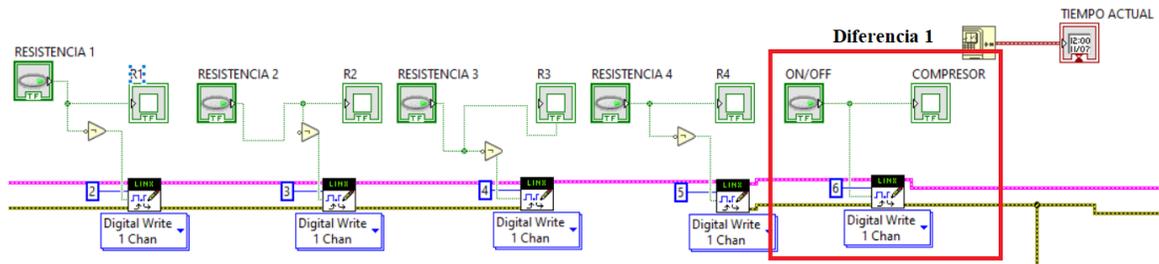
Para este VI tenemos una programación similar a la de la anterior sección.

Existen dos diferencias:

- La primera diferencia mostrada en la **Figura 61** radica en la activación del compresor de la unidad de refrigeración.

Figura 61

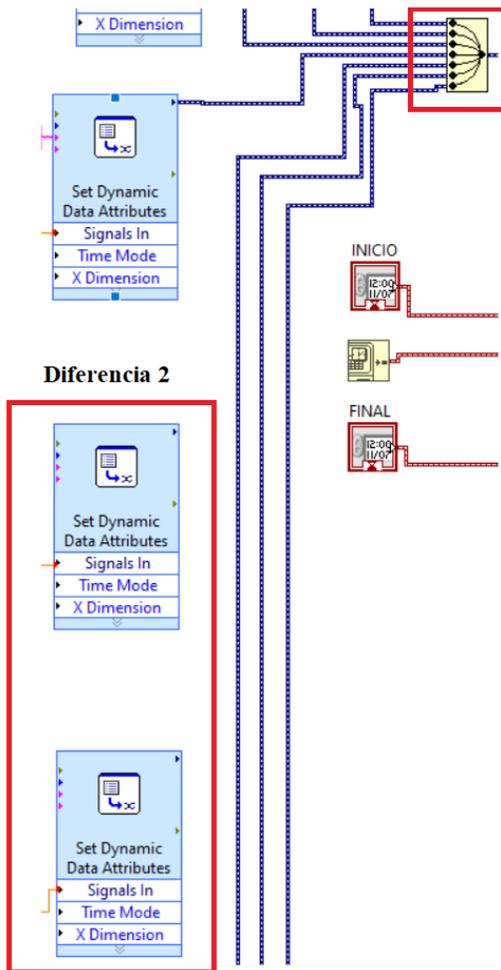
Activación del compresor desde el Block Diagram



La segunda diferencia mostrada en la **Figura 62** es la eliminación de las señales analógicas pertenecientes a las temperaturas intermedias de los módulos intercambiadores de calor, ya que en el evaporador solo tenemos una entrada y salida del refrigerante.

Figura 62

Eliminación de señales analógicas



Capítulo VI Recolección y análisis de datos

Condiciones para las realizar las prácticas

Las pruebas realizadas en los intercambiadores de calor para la recolección de datos de temperatura se hicieron bajo las siguientes condiciones que se muestran en la **Tabla 36**, esto con el fin académico de asegurar que exista una transferencia de calor apreciable entre el aire y el agua, para el caso de la lectura de velocidad del aire se puede usar un anemómetro o con la presión que se toma se puede usar la **Tabla 31**.

El resumen de todas las prácticas propuestas se puede apreciar en la **Tabla 37**.

Tabla 36

Condiciones iniciales para las pruebas realizadas

Condición	Especificación
Caudal de agua	Aprox. 12 LPM
Temperatura del reservorio de agua	3 °C a 8 °C
Temperatura ambiente	20 °C a 25 °C
% de abertura del ventilador	25% y 50%
Tiempo de la práctica	30 min por práctica
V_{in} del aire al 25% de abertura (tubos lisos y aletas)	Aprox. 1.2 $\frac{m}{s}$
Resistencias eléctricas	500 W c/u

Nota. Para lograr el caudal de 12 LPM, en el banco de pruebas, se recomienda cerrar toda la válvula de la tubería que permite el retorno del agua al reservorio y abrirla 3 vueltas de 380 grados, en sentido horario, además, la abertura del 50% solo se aplicó en el evaporador.

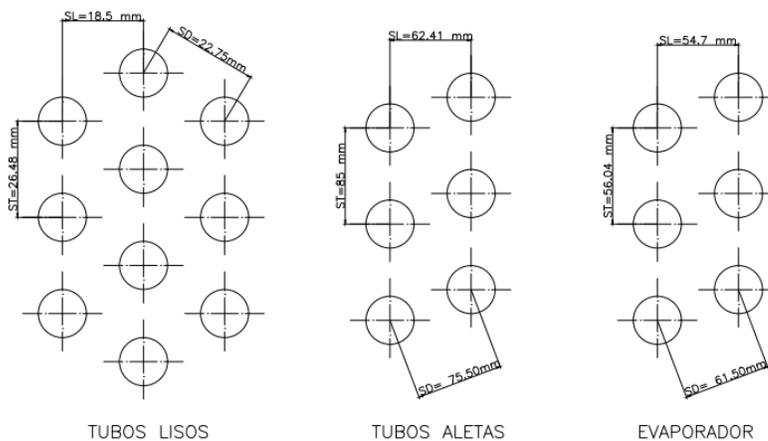
Tabla 37

Listado de las prácticas a realizar en el túnel de aire multipropósito

Nombre de la Práctica	Detalle
Práctica 1 - IC-TL-SIMPLE-1	Intercambiador de calor de tubos lisos, en paso simple al 25% de abertura con 1500W
Práctica 2 - IC-TL-TRIPLE-1	Intercambiador de calor de tubos lisos, en paso triple al 25% de abertura con 1500W
Práctica 3 - IC-TA-SIMPLE-1	Intercambiador de calor de tubos con aletas, en paso simple al 25% de abertura con 1500W
Práctica 4 - IC-TA-TRIPLE-1	Intercambiador de calor de tubos con aletas, en paso triple al 25% de abertura con 1500W
Práctica 5 - REFRIGERACION-1	Unidad de refrigeración, 25% de abertura con 1500W
Práctica 6 - REFRIGERACION-2	Unidad de refrigeración, 50% de abertura con 1500W

Figura 63

Distribución de tubos escalonados para el intercambiador de calor de tubos lisos, tubos con aletas y el evaporador

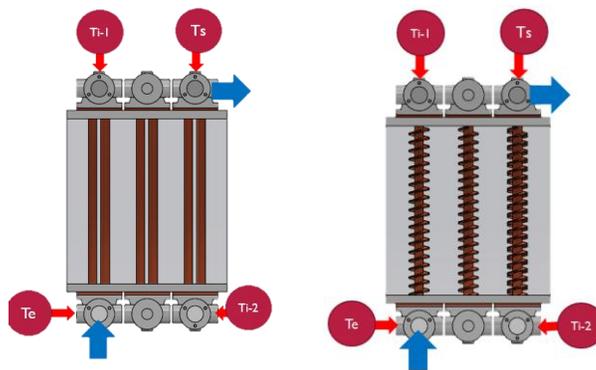


Recolección de datos

En la **Figura 64** y **Figura 65** se pueden observar los puntos en los cuales se colocaron los sensores de temperatura en los intercambiadores de calor de tubos lisos y con aletas, además, se indica los puntos para las tomas de presión y las temperaturas del aire a la entrada y salida.

Figura 64

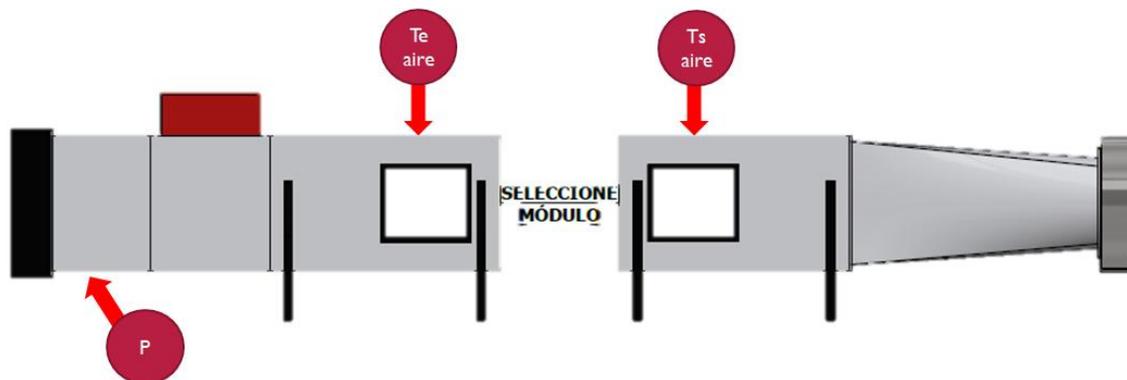
Puntos para la toma de datos en los intercambiadores de calor



Nota. Los puntos de toma de datos son los mismos en los dos intercambiadores de calor, en simple y triple paso.

Figura 65

Puntos para la toma de datos en el túnel de aire multipropósito



La nomenclatura que se muestra en **Tabla 38** usada para los intercambiadores de calor de tubos lisos y con aletas es la misma para simple y triple paso, además, la nomenclatura de las temperaturas del aire a la entrada y salida es la misma para todas las pruebas.

Tabla 38

Nomenclatura usada en la recolección de datos

Código	Significado
$T_{e_{aire}}$	Temperatura del aire a la entrada del ducto
$T_{s_{aire}}$	Temperatura del aire a la salida del ducto
$T_{e_{agua}}$	Temperatura del agua a la entrada del intercambiador
$T_{s_{agua}}$	Temperatura del agua a la salida del intercambiador
T_{i_1}	Temperatura intermedia 1
T_{i_2}	Temperatura intermedia 2
P	Presión a la entrada del ducto
T_{eva}	Temperatura en el evaporador
$T_{s_{eva}}$	Temperatura de salida del evaporador
P_{eva}	Presión del evaporador
$T_{e_{R164a}}$	Temperatura del refrigerante a la entrada
$T_{s_{R164a}}$	Temperatura del refrigerante a la salida

Datos del intercambiador de calor de tubos lisos

Tabla 39

Datos del tomados para la Práctica 1- IC-TL-SIMPLE-1

Tiempo (min)	$T_{e_{aire}}$ (°C)	$T_{s_{aire}}$ (°C)	$T_{e_{agua}}$ (°C)	$T_{s_{agua}}$ (°C)	T_{i_1} (°C)	T_{i_2} (°C)	P (N/m ²)
0	45,86	34,59	5,42	8,42	6,89	5,61	1,33
3	45,88	32,12	5,32	6,73	5,68	5,59	1,33
6	45,76	31,74	5,04	6,68	5,73	5,32	1,31

Tiempo (min)	$T_{e\text{aire}}$ (°C)	$T_{s\text{aire}}$ (°C)	$T_{e\text{agua}}$ (°C)	$T_{s\text{agua}}$ (°C)	T_{i_1} (°C)	T_{i_2} (°C)	P (N/m^2)
9	46,01	31,69	4,88	6,43	5,46	5,23	1,33
12	46,15	31,7	4,88	6,45	5,51	5,16	1,32
15	46,12	32,01	4,83	6,42	5,54	5,26	1,31
18	46,2	31,96	4,95	6,51	5,5	5,17	1,33
21	46,19	31,85	4,96	6,5	5,7	5,15	1,31
24	46,22	31,88	5,07	6,51	5,59	5,23	1,32
27	46,2	31,74	4,93	6,65	5,64	5,27	1,31
30	46,21	31,6	5,09	6,58	5,43	5,18	1,32

Figura 66

Tendencia de las temperaturas del aire en la Práctica 1-IC-TL-SIMPLE-1

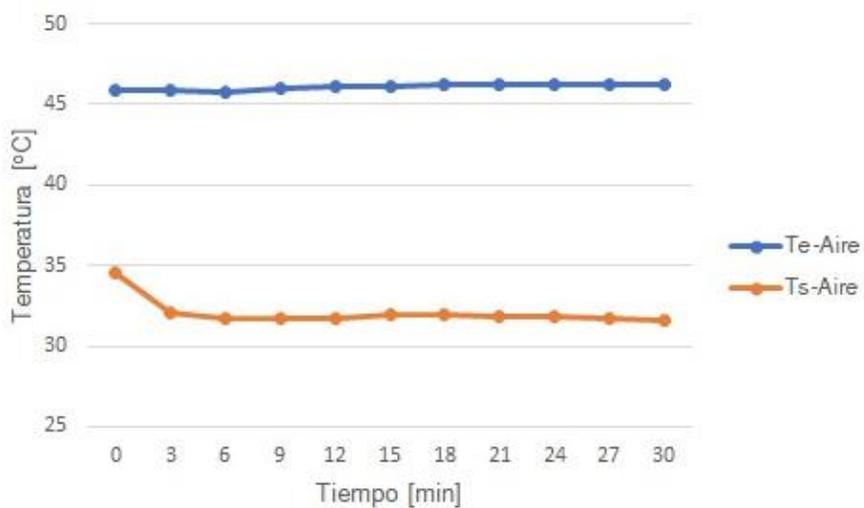


Figura 67

Tendencia de las temperaturas del agua en la Práctica 1-IC-TL-SIMPLE-1

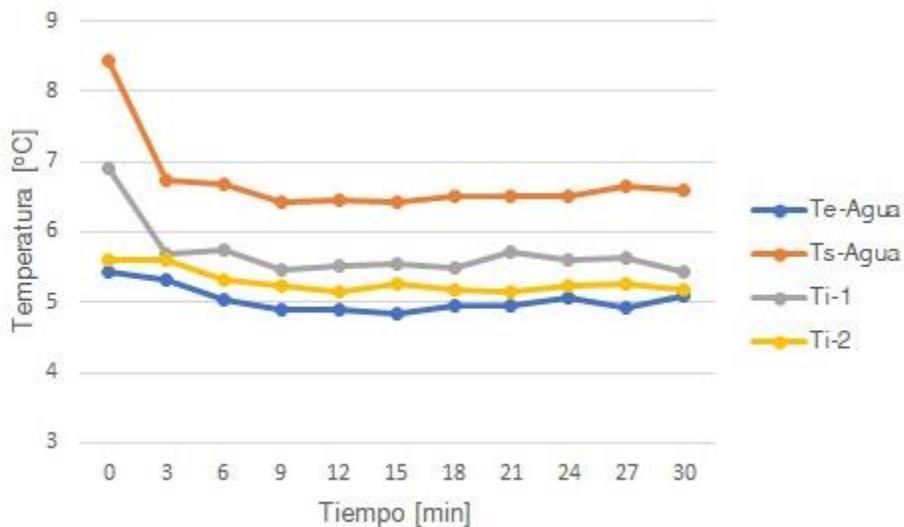


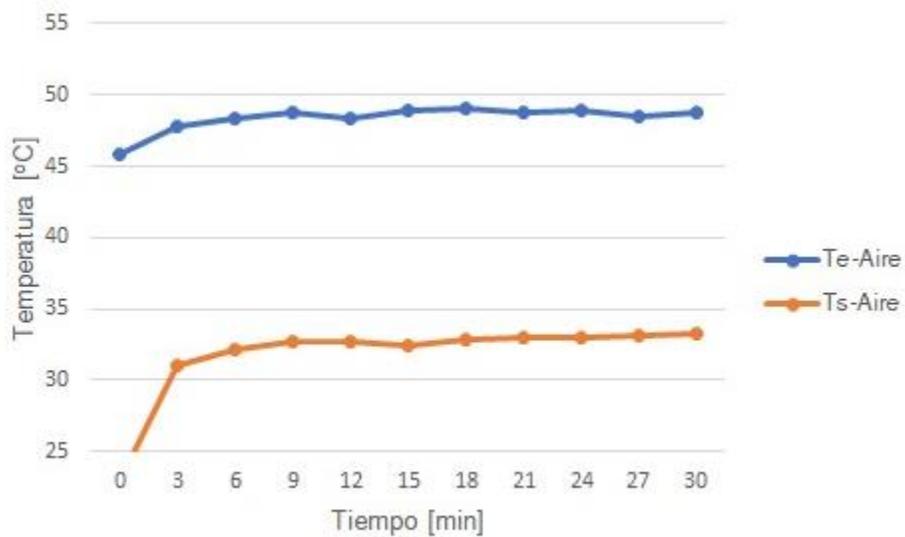
Tabla 40

Datos del tomados para la Práctica 2- IC-TL-TRIPLE-1

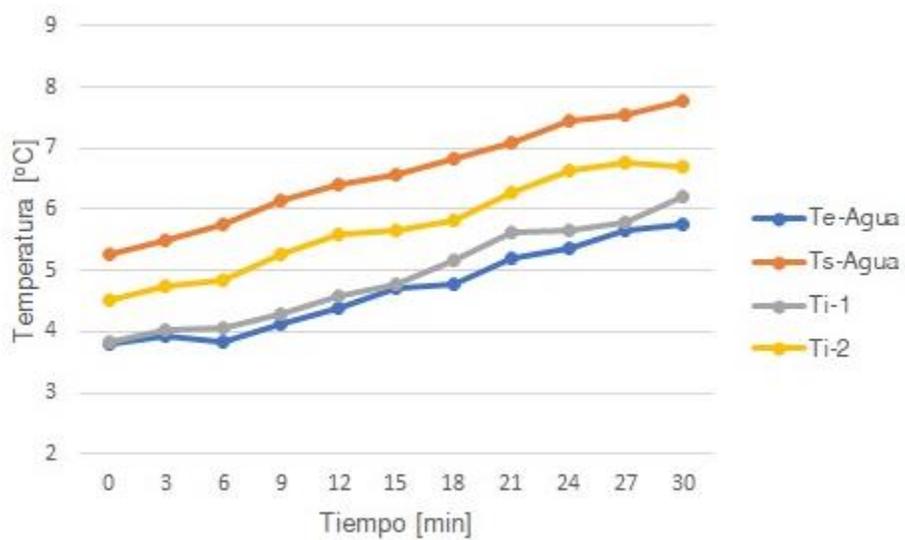
Tiempo (min)	$T_{e_{aire}}$ (°C)	$T_{s_{aire}}$ (°C)	$T_{e_{agua}}$ (°C)	$T_{s_{agua}}$ (°C)	T_{i_1} (°C)	T_{i_2} (°C)	P (N/m^2)
0	45,86	22,94	3,80	5,26	3,83	4,51	1,27
3	47,73	30,97	3,94	5,50	4,04	4,76	1,25
6	48,29	32,19	3,84	5,76	4,05	4,85	1,25
9	48,78	32,69	4,13	6,15	4,28	5,28	1,25
12	48,41	32,75	4,39	6,39	4,59	5,59	1,25
15	48,84	32,41	4,72	6,58	4,79	5,66	1,26
18	49,06	32,91	4,77	6,82	5,18	5,81	1,25
21	48,82	32,95	5,21	7,10	5,62	6,28	1,25
24	48,93	33,01	5,35	7,44	5,67	6,64	1,25
27	48,5	33,13	5,66	7,56	5,78	6,75	1,25
30	48,72	33,25	5,77	7,76	6,21	6,71	1,25

Figura 68

Tendencia de las temperaturas del aire en la Práctica 2-IC-TL-TRIPLE-1

**Figura 69**

Tendencia de las temperaturas del agua en la Práctica 2-IC-TL-TRIPLE-1



Datos del intercambiador de calor de tubos con aletas

Tabla 41

Datos del tomados para la Práctica 3- IC-TA-SIMPLE-1

Tiempo (min)	$T_{e_{aire}}$ (°C)	$T_{s_{aire}}$ (°C)	$T_{e_{agua}}$ (°C)	$T_{s_{agua}}$ (°C)	T_{i_1} (°C)	T_{i_2} (°C)	P (N/m ²)
0	46,56	32,63	3,33	4,89	3,89	3,54	1,36
3	46,50	32,95	3,35	4,93	4,00	3,66	1,36
6	46,58	33,02	3,56	4,9	4,08	3,77	1,36
9	46,44	32,96	3,76	5,01	4,30	3,9	1,36
12	46,62	33,22	3,79	5,23	4,35	4,02	1,36
15	46,66	33,31	3,83	5,21	4,43	4,15	1,36
18	46,61	33,15	4,1	5,49	4,70	4,19	1,36
21	46,69	33,35	4,41	5,64	4,89	4,57	1,36
24	46,64	33,18	4,65	5,93	5,09	4,71	1,36
27	46,97	33,58	5,23	6,54	5,85	5,44	1,36
30	46,96	33,74	6,06	7,38	6,54	6,21	1,36

Figura 70

Tendencia de las temperaturas del aire en la Práctica 3-IC-TA-SIMPLE-1

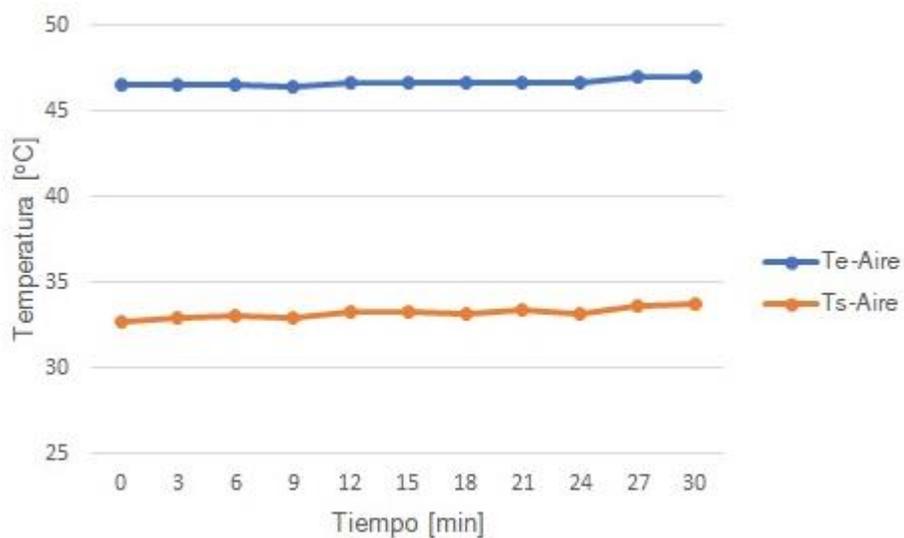


Figura 71

Tendencia de las temperaturas del agua en la Práctica 3-IC-TA-SIMPLE-1

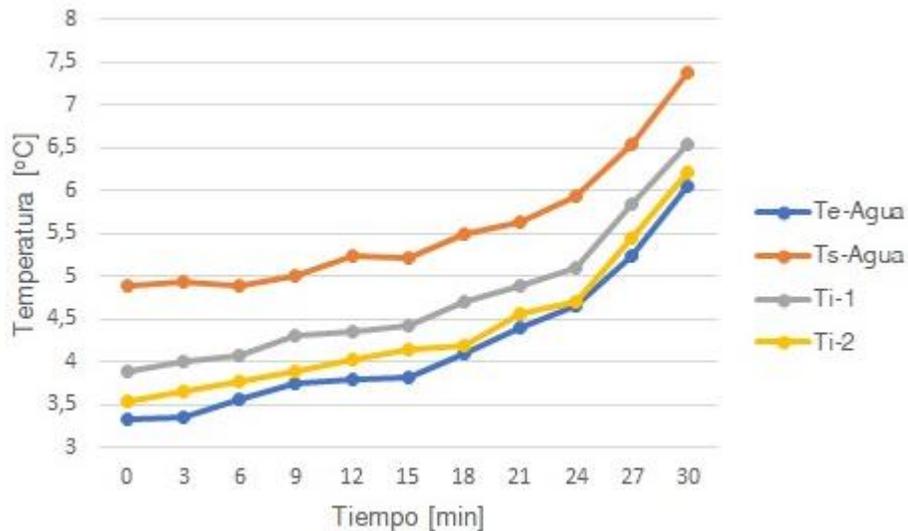


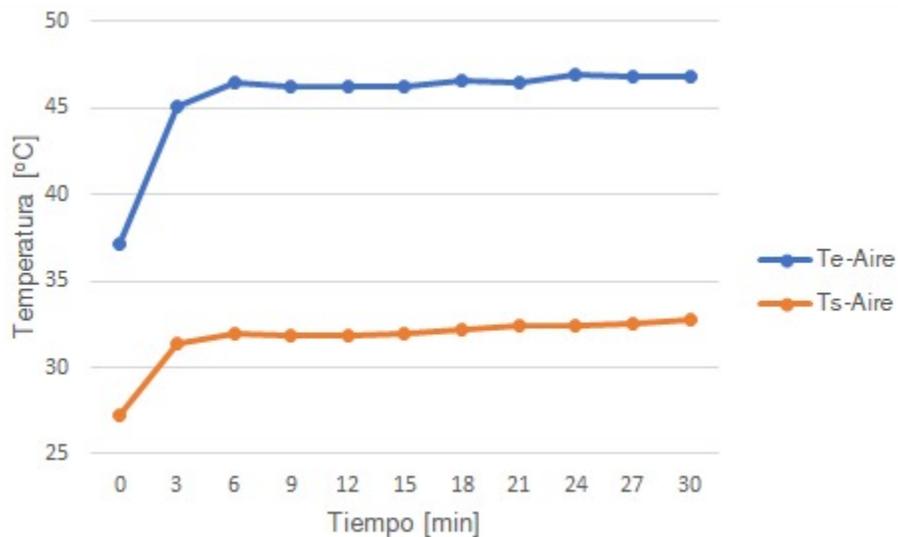
Tabla 42

Datos del tomados para la Práctica 4- IC-TA-TRIPLE-1

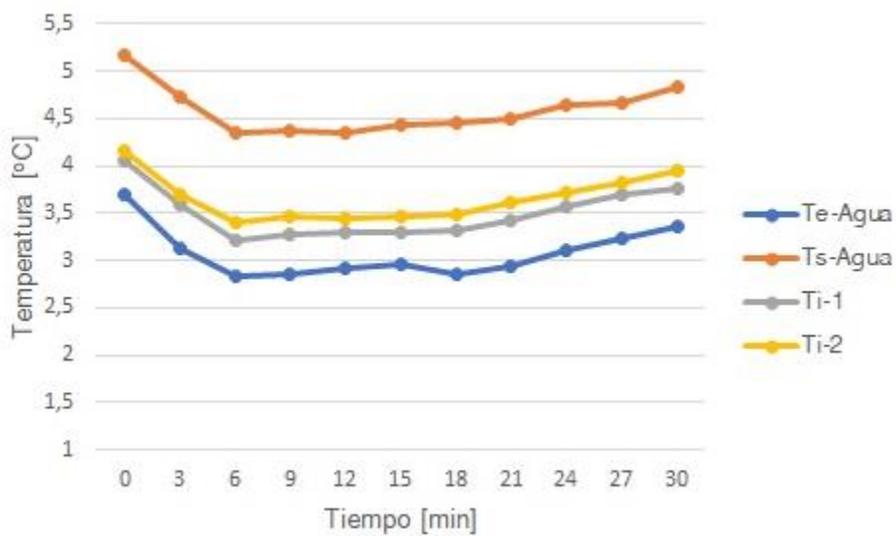
Tiempo (min)	$T_{e\text{aire}}$ (°C)	$T_{s\text{aire}}$ (°C)	$T_{e\text{agua}}$ (°C)	$T_{s\text{agua}}$ (°C)	T_{i_1} (°C)	T_{i_2} (°C)	P (N/m^2)
0	37,11	27,29	3,69	5,18	4,05	4,17	1,33
3	45,14	31,42	3,13	4,72	3,6	3,69	1,33
6	46,45	31,99	2,84	4,35	3,22	3,4	1,33
9	46,28	31,81	2,85	4,37	3,28	3,46	1,33
12	46,25	31,85	2,92	4,35	3,29	3,44	1,33
15	46,25	31,97	2,96	4,44	3,3	3,47	1,33
18	46,64	32,15	2,86	4,45	3,32	3,49	1,33
21	46,469	32,39	2,93	4,5	3,43	3,61	1,33
24	46,95	32,4	3,11	4,65	3,57	3,72	1,33
27	46,8	32,52	3,23	4,66	3,69	3,83	1,33
30	46,86	32,75	3,36	4,83	3,77	3,94	1,33

Figura 72

Tendencia de las temperaturas del aire en la Práctica 4-IC-TA-TRIPLE-1

**Figura 73**

Tendencia de las temperaturas del agua en la Práctica 4-IC-TA-SIMPLE-1



Datos de la unidad de refrigeración

Tabla 43

Datos del tomados para la Práctica 5-REFRIGERACIÓN-1

Tiempo (min)	$T_{e_{aire}}$ (°C)	$T_{s_{aire}}$ (°C)
0	43,62	31,41
3	43,91	31,51
6	43,81	31,52
9	44,34	31,65
12	44,53	32,1
15	44,14	31,75
18	44,27	31,62
21	44,71	31,91
24	44,57	31,95
27	44,45	31,71
30	44,54	31,7

Figura 74

Tendencia de las temperaturas del aire de la Práctica 5-REFRIGERACIÓN-1

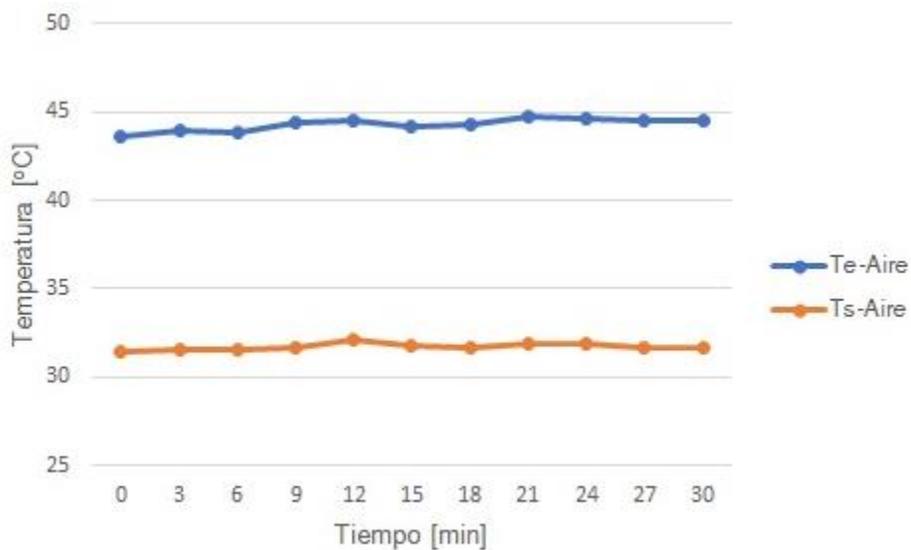


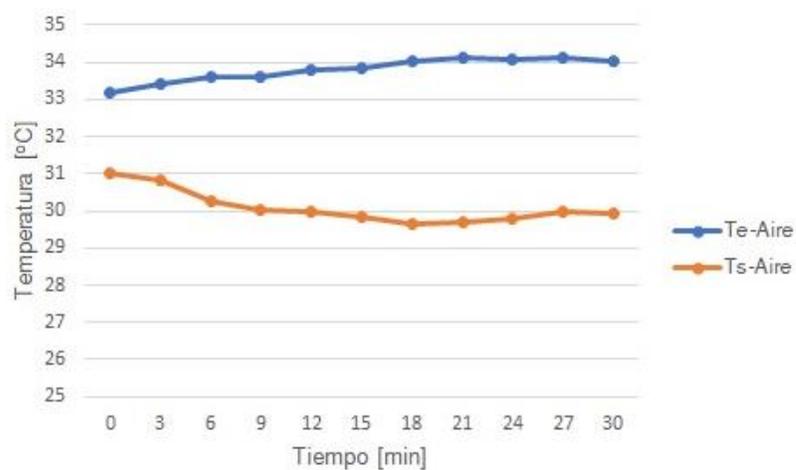
Tabla 44

Datos del tomados para la Práctica 6-REFRIGERACION-2

Tiempo (min)	$T_{e\text{aire}}$ (°C)	$T_{s\text{aire}}$ (°C)
0	33,2	31,01
3	33,4	30,85
6	33,6	30,24
9	33,6	30,02
12	33,79	29,98
15	33,84	29,86
18	34,01	29,65
21	34,11	29,72
24	34,1	29,8
27	34,12	33,58
30	34,01	33,74

Figura 75

Tendencia de las temperaturas para la Práctica 6-REFRIGERACION-2



Ejemplo de cálculos

Práctica 1 - IC-TL-SIMPLE-1

Intercambiador de calor de tubos lisos con simple paso, una potencia de 1500W, considerando una abertura del 25% a un caudal de agua de 12LPM.

Datos:

$$T_{e_{aire}} = 46.21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{s_{aire}} = 31.60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{e_{agua}} = 5.09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{s_{agua}} = 6.58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$D = 0.0159 \text{ m}$$

$$S_L = 0.0184 \text{ m}$$

$$S_T = 0.0241 \text{ m}$$

$$N_L = 6$$

$$N_T = 5$$

$$L = 0.3 \text{ m}$$

$$P = 1.32 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$V_{aire} = 1.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

MÉTODO 1: Zukauskas

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + (S_T/2)^2}$$

$$S_D = \sqrt{(0.0184)^2 + (0.0241/2)^2} = 0.022 \text{ m}$$

Calculamos una temperatura media del aire

$$T_m = \frac{T_{e_{aire}} + T_{s_{aire}}}{2} = \frac{46.21 \text{ °C} + 31.60 \text{ °C}}{2} = 38.905 \text{ °C}$$

Las propiedades termodinámicas del aire a T_m , sacado de la Tabla A-15 (Cengel Y. A., 2011)

$$k = 0.0265 \frac{W}{m \cdot \text{°C}}$$

$$C_p = 1.007 \frac{KJ}{Kg \cdot \text{°C}}$$

$$\mu = 1.912 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$\rho = 1.130 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{T=46.21 \text{ °C}} = 1.104 \frac{kg}{m^3}$$

$$Pr = 0.7257$$

$$Pr_{s-T=5.09 \text{ °C}} = 0.7350$$

Calculamos el número de Reynolds

$$V_{max} = \frac{S_T \cdot V_{aire}}{2(S_D - D)} = \frac{0.0241 \text{ m} \times 1.2 \frac{m}{s}}{2 \times (0.022 \text{ m} - 0.0159 \text{ m})} = 2.37 \frac{m}{s}$$

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V_{max} \cdot D}{\mu} = \frac{1.130 \frac{kg}{m^3} \times 2.37 \frac{m}{s} \times 0.0159 \text{ m}}{1.912 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}} = 2227.543$$

El número de Nusselt lo calculamos con el Re_D según la **Tabla 4**.

$$Nu_D = 0.35 \cdot (S_T / S_L)^{0.2} \cdot Re_D^{0.6} \cdot Pr^{0.36} \cdot (Pr / Pr_s)^{0.25}$$

$$Nu_D = 0.35 \left(\frac{0.0241 \text{ m}}{0.0185 \text{ m}} \right)^{0.2} (2227.543)^{0.6} (0.7257)^{0.36} \left(\frac{0.7257}{0.7350} \right)^{0.25} = 33.473$$

Como $N_L = 6$ es menor que 16, usamos el factor de corrección de la **Tabla 5**.

$$F = 0.945$$

$$Nu_c = F \cdot Nu_D = 0.945 \times 33.473 = 31.632$$

El coeficiente de convección

$$h = \frac{Nu_c \cdot k}{D} = \frac{31.193 \times 0.0265 \frac{W}{m^{\circ}C}}{0.0159 \text{ m}} = 52.78 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

Determinamos el área de transferencia de calor y comparamos con el área proporcionada en el manual del equipo.

$$A_s = N \cdot \pi \cdot D \cdot L = 33 \times \pi \times 0.0159 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} = 0.495 \text{ m}^2$$

$$A_{sManual} = 0.494 \text{ m}^2$$

El flujo másico de aire

$$\dot{m}_{aire} = \rho_{T=46.21^{\circ}C} \cdot V_{aire} \cdot (N_T \times S_T \times L)$$

$$\dot{m}_{aire} = 1.104 \frac{kg}{m^3} \times 1.2 \frac{m}{s} \times (5 \times 0.0241 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}) = 0.048 \frac{kg}{s}$$

Calculamos la temperatura de salida de aire teórica

$$T_e = T_{e_{agua}} - (T_{e_{agua}} - T_{e_{aire}}) \exp\left(-\frac{A_s \cdot h}{\dot{m} \cdot C_p}\right)$$

$$T_e = 5.09^\circ\text{C} - (5.09^\circ\text{C} - 46.21^\circ\text{C}) \exp\left(-\frac{0.494 \text{ m}^2 \times 52.78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}}{0.048 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}}\right) = 29.037^\circ\text{C}$$

El error entre las temperaturas de salida de aire teórica y la experimental

$$\text{Error } T_{s_{aire}} = \left| \frac{T_e - T_{s_{aire}}}{T_e} \right|$$

$$\text{Error } T_{s_{aire}} = \left| \frac{29.037^\circ\text{C} - 31.6^\circ\text{C}}{29.037^\circ\text{C}} \right| \times 100 = 8.825\%$$

La diferencia media de temperatura logarítmica experimental

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{e_{agua}} - T_e) - (T_{e_{agua}} - T_{e_{aire}})}{\ln\left[\frac{(T_{e_{agua}} - T_e)}{(T_{e_{agua}} - T_{e_{aire}})}\right]}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(5.09^\circ\text{C} - 29.037^\circ\text{C}) - (5.09^\circ\text{C} - 46.21^\circ\text{C})}{\ln\left[\frac{(5.09^\circ\text{C} - 29.037^\circ\text{C})}{(5.09^\circ\text{C} - 46.21^\circ\text{C})}\right]} = -31.764^\circ\text{C}$$

Calculamos el calor cedido por el aire

$$\dot{Q}_1 = h \cdot A_s \cdot \Delta T_{ml}$$

$$\dot{Q}_1 = 52.048 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}} \times 0.494 \text{ m}^2 \times -32.051^\circ\text{C} = -828.179 \text{ W}$$

MÉTODO 2: Diferencia Media Logarítmica y Factor de Corrección

Datos:

$$b_{ducto} = 0.14\text{m}$$

$$h_{ducto} = 0.3\text{m}$$

El área a la entrada del ducto es

$$A_{ducto} = (0.3\text{m} \times 0.15\text{m}) = 0.042 \text{ m}^2$$

Calculamos el flujo másico del aire del ducto

$$\dot{m}_{aire} = \rho_{T=46.96^{\circ}\text{C}} \cdot V_{aire} \cdot (A_{ducto})$$

$$\dot{m}_{aire} = 1.104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times (0.042 \text{ m}^2) = 0.0556 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

La razón de transferencia de calor

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{aire} \cdot c_p (T_{s_{aire}} - T_{e_{aire}})$$

$$\dot{Q}_2 = 0.0556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1.007 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}} \times (31.60^{\circ}\text{C} - 46.21^{\circ}\text{C}) = -818.614 \text{ W}$$

Hallamos el coeficiente global de transferencia de calor U_{aire}

$$Q_2 = U_{aire} \cdot A_{S_{manual}} \cdot F \cdot \Delta T_{ml}$$

La temperatura media logarítmica

$$\Delta T_{ml,CF} = \frac{(46.21^{\circ}\text{C} - 6.58^{\circ}\text{C}) - (31.6^{\circ}\text{C} - 5.09^{\circ}\text{C})}{\ln\left(\frac{(31.60^{\circ}\text{C} - 6.58^{\circ}\text{C})}{(46.21^{\circ}\text{C} - 5.09^{\circ}\text{C})}\right)}$$

$$\Delta T_{ml,CF} = 32.632^{\circ}\text{C}$$

Para calcular el factor de corrección F, encontramos P y R de las **Figura 3**

$$P = \frac{T_{s_{agua}} - T_{e_{agua}}}{T_{e_{aire}} - T_{e_{agua}}}$$

$$P = \frac{6.58^{\circ}\text{C} - 5.09^{\circ}\text{C}}{46.21^{\circ}\text{C} - 6.58^{\circ}\text{C}} = 0.036$$

$$R = \frac{T_{e_{aire}} - T_{s_{aire}}}{T_{s_{agua}} - T_{e_{agua}}}$$

$$P = \frac{46.21^{\circ}\text{C} - 31.6^{\circ}\text{C}}{6.58^{\circ}\text{C} - 5.09^{\circ}\text{C}} = 9.805$$

Por lo tanto, el factor de corrección

$$F = 1$$

$$\frac{|Q_2|}{A_{S_{manual}} \cdot F \cdot \Delta T_{ml}} = U_{aire}$$

$$U_{aire} = \frac{|-818.614 \text{ W}|}{0.494 \text{ m}^2 \times 1 \times 32.632 \text{ }^\circ\text{C}} = 50.78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}}$$

Determinamos los errores entre el **MÉTODO 1** y **MÉTODO 2**

- El error la tasa de transferencia de calor

$$E_{\dot{Q}} = \left| \frac{|\dot{Q}_2| - |\dot{Q}_1|}{|\dot{Q}_2|} \right| \times 100$$

$$E_{\dot{Q}} = \left| \frac{818.614 \text{ W} - 828.179 \text{ W}}{818.14 \text{ W}} \right| \times 100 = 1.16\%$$

- El error entre el coeficiente global de transferencia de calor U y el coeficiente de convección del aire h

$$E_{\dot{Q}} = \left| \frac{U_{aire} - h}{U_{aire}} \right| \times 100$$

$$E_{U-h} = \left| \frac{50.783 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} - 52.78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}}{50.78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} \right| \times 100 = 3.99\%$$

Práctica 3 - IC-TA-SIMPLE-1

Intercambiador de calor de tubos con aletas a simple paso, una potencia de 1500W, considerando una abertura del 25% a un caudal de agua de 12LPM.

Datos:

$$T_{e_{aire}} = 46.96 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{s_{aire}} = 33.74 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{e_{agua}} = 6.06 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{s_{agua}} = 7.38 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$D = 0.01588 \text{ m}$$

$$S_L = 0.06241 \text{ m}$$

$$S_T = 0.085 \text{ m}$$

$$N_L = 3$$

$$N_T = 2$$

$$L = 0.3 \text{ m}$$

$$P = 1.32 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$V_{\text{aire}} = 1.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

MÉTODO 1: Zukauskas

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + (S_T/2)^2}$$

$$S_D = \sqrt{(0.06241)^2 + (0.085/2)^2} = 0.0755 \text{ m}$$

Calculamos una temperatura media del aire

$$T_m = \frac{T_{e\text{aire}} + T_{s\text{aire}}}{2} = \frac{46.96 \text{ °C} + 33.74 \text{ °C}}{2} = 40.35 \text{ °C}$$

Las propiedades termodinámicas del aire a T_m , sacado de la Tabla A-15 (Cengel Y. A.,

2011)

$$k = 0.0266 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°C}}$$

$$C_p = 1.007 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{°C}}$$

$$\mu = 1.919 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$\rho = 1.125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{T=46.96^{\circ}\text{C}} = 1.102 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Pr = 0.7254$$

$$Pr_{s-T=6.06^{\circ}\text{C}} = 0.734$$

Calculamos el número de Reynolds

$$V_{max} = \frac{S_T \cdot V_{aire}}{2(S_D - D)} = \frac{0.085 \text{ m} \times 1.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \times (0.0755 \text{ m} - 0.01588 \text{ m})} = 0.855 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V_{max} \cdot D}{\mu} = \frac{1.125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.855 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.01588 \text{ m}}{1.919 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} = 796.354$$

El número de Nusselt lo calculamos con el Re_D según la **Tabla 4**.

$$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr / Pr_s)^{0.25}$$

$$Nu_D = 0.71 (796.354)^{0.5} (0.7254)^{0.36} \left(\frac{0.7254}{0.734} \right)^{0.25} = 17.792$$

Como $N_L = 6$ es menor que 16, usamos el factor de corrección de la **Tabla 5**.

$$F = 0.84$$

$$Nu_c = F \cdot Nu_D = 0.84 \times 17.92 = 14.946$$

El coeficiente de convección

$$h = \frac{Nu_c \cdot k}{D} = \frac{14.946 \times 0.0266 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}}{0.01588 \text{ m}} = 25.073 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

Determinamos el área proporcionada en el manual del equipo.

$$A_{sManual} = 0.478 \text{ m}^2$$

El flujo másico de aire

$$\dot{m}_{aire} = \rho_{T=46.96^\circ\text{C}} \cdot V_{aire} \cdot (N_T \times S_T \times L)$$

$$\dot{m}_{aire} = 1.102 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times (2 \times 0.085 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}) = 0.067 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Calculamos la temperatura de salida de aire teórica

$$T_e = T_{e_{agua}} - (T_{e_{agua}} - T_{e_{aire}}) \exp\left(-\frac{A_{sManual} \cdot h}{\dot{m} \cdot C_p}\right)$$

$$T_e = 5.09^\circ\text{C} - (5.09^\circ\text{C} - 46.21^\circ\text{C}) \exp\left(-\frac{0.478 \text{ m}^2 \times 25.073 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}}{0.067 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}}\right) = 40.343^\circ\text{C}$$

El error entre las temperaturas de salida de aire teórica y la experimental

$$\text{Error } T_{s_{aire}} = \left| \frac{T_e - T_{s_{aire}}}{T_e} \right|$$

$$\text{Error } T_{s_{aire}} = \left| \frac{40.343^\circ\text{C} - 33.74^\circ\text{C}}{40.343^\circ\text{C}} \right| \times 100 = 16.368\%$$

MÉTODO 2: Diferencia Media logarítmica y Factor de Corrección

Datos:

$$b_{ducto} = 0.14 \text{ m}$$

$$h_{ducto} = 0.3 \text{ m}$$

El área a la entrada del ducto es

$$A_{ducto} = (0.3 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}) = 0.042 \text{ m}^2$$

Calculamos el flujo másico del aire del ducto

$$\dot{m}_{aire} = \rho_{T=46.96^\circ\text{C}} \cdot V_{aire} \cdot (A_{ducto})$$

$$\dot{m}_{aire} = 1.102 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times (0.042 \text{ m}^2) = 0.056 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

La razón de transferencia de calor

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{aire} \cdot c_p (T_{s_{aire}} - T_{e_{aire}})$$

$$\dot{Q}_2 = 0.055 \frac{kg}{s} \times 1.007 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C} \times (31.60 \text{ } ^\circ C - 46.21 \text{ } ^\circ C) = -739.38 W$$

Hallamos el coeficiente global de transferencia de calor U_{aire}

$$Q_2 = U_{aire} \cdot A_{s_{manual}} \cdot F \cdot \Delta T_{ml}$$

La temperatura media logarítmica

$$\Delta T_{ml,CF} = \frac{(46.96 \text{ } ^\circ C - 6.06 \text{ } ^\circ C) - (31.6 \text{ } ^\circ C - 7.39 \text{ } ^\circ C)}{\ln \left(\frac{(33.74 \text{ } ^\circ C - 6.06 \text{ } ^\circ C)}{(46.96 \text{ } ^\circ C - 7.39 \text{ } ^\circ C)} \right)}$$

$$\Delta T_{ml,CF} = 33.276 \text{ } ^\circ C$$

Para calcular el factor de corrección F, encontramos P y R de las **Figura 3**

$$P = \frac{T_{s_{agua}} - T_{e_{agua}}}{T_{e_{aire}} - T_{e_{agua}}}$$

$$P = \frac{7.38 \text{ } ^\circ C - 6.06 \text{ } ^\circ C}{46.96 \text{ } ^\circ C - 6.06 \text{ } ^\circ C} = 0.032$$

$$R = \frac{T_{e_{aire}} - T_{s_{aire}}}{T_{s_{agua}} - T_{e_{agua}}}$$

$$P = \frac{46.96 \text{ } ^\circ C - 33.74 \text{ } ^\circ C}{7.38 \text{ } ^\circ C - 6.06 \text{ } ^\circ C} = 10.015$$

Por lo tanto, el factor de corrección

$$F = 1$$

$$\frac{|Q_2|}{A_{s_{manual}} \cdot F \cdot \Delta T_{ml}} = U_{aire}$$

$$U_{aire} = \frac{|-739.38 W|}{0.494 m^2 \times 1 \times 32.632 \text{ } ^\circ C} = 46.485 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Análisis de resultados

En la **Tabla 45** se resumen los ΔT del aire y el agua en el intercambiador de calor de tubos lisos y aletas, en la **Tabla 46** de la tasa de transferencia de calor \dot{Q} y los coeficientes de transferencia de calor U y h , calculados con el método 1 (Método de Zukauskas) y con el método 2 (Diferencia media logarítmica y factor de corrección), para el módulo de tubos lisos, podemos observar que el intercambio de calor es menor en la configuración de simple paso con 828.179 W con el método 1 y con el método 2 fue de 818.614 W , con un error del 1.16% entre ambos métodos, esto si lo comparamos con el triple paso que nos da 862.72 W con el método 1 y con el método 2 fue de 860.52 W , con un error del 0.25%, estos errores aparecen ya que cada teoría tiene diferentes consideraciones, sin embargo se aprecia que los valores son similares.

Los coeficientes de transferencia de calor h y U para la configuración de simple paso son $52.78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ y $50.78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$, mientras que para el triple paso los resultados fueron $52.718 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ y $51.57 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$, si se analiza estos datos se puede concluir que mientras mayor sean estos valores, tendremos una mayor tasa de transferencia de calor.

Tabla 45

Resultado de la recolección de datos para el intercambiador de calor de tubos lisos y aletas

Módulo	ΔT_{aire} (°C)	ΔT_{agua} (°C)
Práctica 1 - IC-TL-SIMPLE-1	14,61	1,49
Práctica 2 - IC-TL-TRIPLE-1	15,47	1,99
Práctica 3 - IC-TA-SIMPLE-1	13,22	1,32
Práctica 4 - IC-TA-TRIPLE-1	14,11	1,47

Tabla 46

Resultados obtenidos para el Módulo Intercambiador de Calor de Tubos Lisos

Tubos Lisos	Método 1 $\dot{Q}_1 (W)$	Método 2 $\dot{Q}_2 (W)$	Método 1 $h (W/m^2K)$	Método 2 $U (W/m^2K)$
Práctica 1 - IC - TL - SIMPLE - 1	828.179	818.614	52.78	50.783
Práctica 2 - IC - TL - TRIPLE - 1	862.72	860.52	52.718	51.578

En la **Tabla 47** se muestran los resultados para el intercambiador de tubos con aletas, con triple y simple paso, para este caso de aletas y del evaporador de la unidad de refrigeración no se consideró el método de Zukauskas y solo se realizaron los cálculos con el segundo método, donde se observa que se tiene una mayor tasa de transferencia de calor con la configuración de triple paso con 789.166 W con respecto al simple paso con 739.389 W. De igual manera mientras mayor sea el coeficiente de transferencia de calor total, tendremos una mayor tasa de transferencia de calor.

Tabla 47

Resultados obtenidos para el Módulo Intercambiador de Calor de Tubos con Aletas

Tubos Aletas	Método 2 $\dot{Q}_2 (W)$	Método 2 $U (W/m^2K)$
Práctica 3 - IC - TA - SIMPLE - 1	739.389	46.485
Práctica 4 - IC - TA - TRIPLE - 1	789.166	46.725

En el caso del evaporador de la unidad de refrigeración como se observa en la **Tabla 48** se tiene una mayor tasa de transferencia de calor para una menor abertura del ventilador coaxial, a un 25% tenemos una tasa de transferencia de calor de 723.349 W, mientras que para una abertura del 50% tenemos 597.208 W, esto se debe a que, si el flujo másico aumenta como

en el caso de la abertura al 50%, el calor generado por las resistencias atraviesa los tubos del evaporador a una mayor velocidad y no se tiene un buen intercambio de calor.

Tabla 48

Resultados obtenidos para el Evaporador y Unidad de Refrigeración.

Evaporador Unidad de Refrigeración	Método 2 $\dot{Q}_2 (W)$	Método 2 $U (W/m^2K)$
Práctica 5 – REFRIGERACION-1	723.349	185.22
Práctica 6 – REFRIGERACION-2	597.208	178.261

La conclusión final a la que se llegó es que el intercambiador que transfiere una mayor cantidad de calor es el de tubos lisos como se observa en la **Figura 76**, esto debido a que tiene una mayor cantidad de tubos y por lo tanto se tiene una mayor área de transferencia de calor, además como se indica en la **Figura 77** cada intercambiador de calor presenta un mayor rendimiento en las configuraciones de triple paso, esto como se mencionó anteriormente es debido a que la cantidad de tiempo que el agua se demora en pasar por el intercambiador de calor es mayor, por que realiza los tres pasos por las corazas.

Como se pudo observar para el caso de tubos lisos se puede calcular la temperatura de salida del aire y compararla con la experimental medida por el sensor de temperatura LM35, teniendo un $Error Ts_{aire}$, además, se puede encontrar otros errores como: $E_{\dot{Q}}$ y un E_{U-h} , en la **Tabla 49**, se muestran dichos errores encontrados en este intercambiador.

Tabla 49

Resumen de análisis de errores encontrados en el intercambiador de tubos lisos

Tubos lisos	<i>Error $T_{s_{aire}}$ %</i>	<i>$E_{\dot{Q}}$ %</i>	<i>E_{U-h} %</i>
Práctica 1 - IC - TL - SIMPLE-1	8.82	6.00	3.93
Práctica 2 - IC - TL - TRIPLE - 1	8.31	0.25	2.21

Mientras que, para el intercambiador de tubos con aletas se aplicó el método 1, únicamente para calcular el *Error $T_{s_{aire}}$* que se muestra en **Tabla 50**.

Tabla 50

Resumen de análisis de errores encontrados en el intercambiador de tubos con aletas.

Tubos lisos	<i>Error $T_{s_{aire}}$ %</i>
Práctica 3 - IC - TA- SIMPLE-1	16.37
Práctica 4 - IC - TA - TRIPLE - 1	17.76

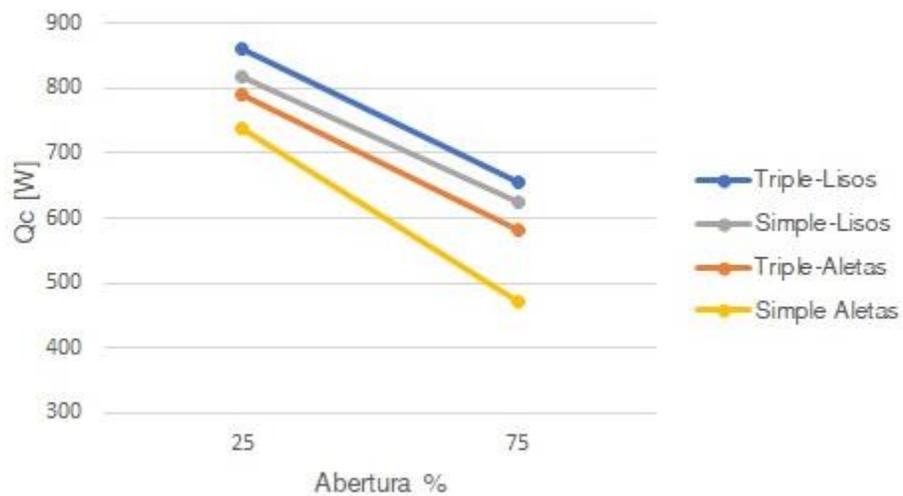
El método de Zukauskas es válido para un banco de tubos lisos, en el caso de un banco de tubos con aletas tenemos errores muy grandes, esto debido a que no se consideran los parámetros de la aleta y por lo tanto si se continua con el método, el error en la tasa de transferencia de calor aumentará, debido a que se sigue propagando los errores.

Figura 76

Intercambio de calor por el aire en Tubos lisos vs Tubos con aletas a 1500W

**Figura 77**

Intercambio de calor por el aire en Tubos lisos vs Tubos con aletas a 1500W



Como se observa en la **Figura 77** se evidencia que a una mayor abertura se tienen una menor transferencia de calor, esto debido a que el flujo del aire será mayor y circula más rápido por el intercambiador de calor, debido a que al aumentar la abertura la velocidad aumenta en el túnel de 1.2 m/s (25%) a 4.2 m/s (50%), lo que ocasiona que el aire gane menos calor de las

resistencias eléctricas y por ende su diferencial de temperatura sea menor como se ve en el la
Tabla 5 del Anexo B, pruebas adicionales para un 75% de abertura.

Capítulo VII Análisis económico

Para determinar los beneficios y pérdidas de la inversión realizada por los estudiantes, elaboramos un análisis financiero en el que se detallan los costos directos e indirectos del proyecto.

Costos directos

Abarcan los costos de honorarios a profesionales, remuneración a no profesionales y estudiantes, costos de instrumentación, costos de materiales y equipos y pruebas de funcionamiento.

Honorarios a profesionales

Estos costos son asumidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” y se detallan en la **Tabla 51**.

Tabla 51

Honorarios para profesionales de la Universidad

Nombre	Cargo	Tiempo (horas)	Valor hora (USD)	Costo total (USD)
Ing. Ángelo Villavicencio.	Director	48	8	384
Ing. Roberto Buenaño.	Laboratorista	48	8	384
Ing. José Guasumba.	Asesoría	4	8	32
			Total (USD)	800

Remuneración de no profesionales

A partir de este punto todos los costos directos serán asumidos voluntariamente por los estudiantes.

Tabla 52*Remuneración a No Profesionales*

Nro.	Función	Tiempo (horas)	Valor hora (USD)	Costo total (USD)
1	Técnico de Refrigeración	8	4	32
2	Técnico Mecánico	8	4	32
3	Técnico de Control	8	4	32
Total (USD)				96

Remuneración Estudiantes

Se reconoce el trabajo realizado por los estudiantes y se detalla en la **Tabla 53**.

Tabla 53*Remuneración a estudiantes*

Nombre	Cargo	Tiempo (horas)	Valor hora (USD)	Costo total (USD)
Sr. Pablo Ambato.	Estudiante	400	4	1600
Sr. Juan Bravo.	Estudiante	400	4	1600
Total (USD)				3200

Costo de Instrumentación

Los costos pertenecientes a la instrumentación utilizada en el proyecto se detallan en la

Tabla 52.**Tabla 54***Costo de la instrumentación utilizada*

Nro.	Descripción	Cantidad	Precio unitario (USD)	Total (USD)
1	Sonda de Temperatura LM35	14	5	70
2	Sensor de Presión MPX5010DP	2	17.50	35
3	Arduino Mega 2560	1	20	20
4	Arduino Uno	2	10	20

Nro.	Descripción	Cantidad	Precio unitario (USD)	Total (USD)
5	Placas de Baquelita y pistas de cobre	2	17	34
6	Módulo 4 Relés	1	8	8
7	Relé 5V	1	2	2
			Total (USD)	189

Costo de Materiales y Equipos

El detalle de costos de los materiales y equipos utilizados en el proyecto se detallan a continuación.

Tabla 55

Costo de Materiales y Equipos

Nro.	Descripción	Cantidad	Precio unitario (USD)	Total (USD)
1	Armario NEMA 12	1	35	35
2	Contactores 120V/220V	5	20	100
3	Cable Sucre 4. Calibre 14	12 metros	2.50	30
4	Cable Flexible Calibre 16	10 metros	1	10
5	Canaleta	2 metros	8	16
6	Mangueras	2 metros	1	2
7	Cable 20 hilos	3 metros	2	6
8	Molex	14	0.5	7
9	Tubo termo encogible y aislante	8	0.35	2.8
10	Caja Arduino Mega 2560	1	8	8
11	Toma corriente	1	2.50	2.50
12	Caja placa secundaria	1	10	10
13	Protector del cable	20 metros	0.5	10
14	Machuelo M5	1	6	6
15	Machuelo M3	1	8	8
16	Machuelo NPT ¾"	1	6	6

Nro.	Descripción	Cantidad	Precio unitario (USD)	Total (USD)
17	Brocas	4	3	12
18	Abrazaderas	8	1.25	10
19	Cepillo de cobre	1	2	2
20	Pernos M3	36	0.15	5.4
21	Pernos M5	72	0.25	18
22	Acoples ¾"	8	1.25	10
23	Casquillo, anillo y manguera ¼"	8	0.30	2.4
24	Rubatex	1	25	25
25	Pinturas de esmalte	½ galón	14	14
26	Pintura aerosol	2	3.5	7
27	Refrigerante R134	1	50	50
28	Válvula de cierre	1	20	20
29	Visor de líquido	1	15	15
30	Filtro Secador	1	25	25
31	Tubo de cobre 3/8"	1 metro	15	15
32	Cepillo de Nylon	1	4	4
33	Fuente de 5V	1	5	5
34	Cable Flat macho 10	3	1.25	3.75
35	Lijas	10	0.70	7
36	Empaques	1 m ²	15	15
37	Monitor LG	1	100	100
			Total (USD)	608

Costos Indirectos

Los costos referentes a servicios básico, transporte, etc., se detallan en la **Tabla 54**.

Tabla 56*Costo Indirectos de Fabricación*

Nro.	Descripción	Cantidad	Precio unitario (USD)	Total (USD)
1	Combustible	1	150	150
2	Transporte	1	50	50
3	Servicios Básicos	1	30	30
4	Parqueadero	2	25	50
5	Alimentación	2	25	50
6	Varios	1	60	60
Total (USD)				390

Costo Total del Proyecto**Tabla 57***Total Costos Directos*

Nro.	Descripción	Costo total (USD)
1	Honorarios a profesionales	800
2	Remuneración de no profesionales	96
3	Remuneración Estudiantes	3200
4	Costo de Instrumentación	189
5	Costo de Materiales y Equipos	608
Total		4893

Tabla 58*Total Costos Indirectos*

Nro.	Descripción	Costo total (USD)
1	Costos indirectos de fabricación	390
Total		390

Tabla 59*Costo total*

Nro.	Descripción	Costo total (USD)
1	Costos Directos	4893
2	Costos Indirectos	390
Total		5283

En la **Tabla 59** se detalla el total y refleja la suma de los costos directos e indirectos del proyecto, dándonos un total de 5283 dólares americanos, de los cuales 4000 dólares americanos es un valor representativo, ya que se considera honorarios de los docentes, que son cubiertos por la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE y honorarios de los estudiantes, la inversión para la elaboración de este proyecto de titulación considerando remuneración de no profesionales, instrumentación, materiales y equipo, además de los costos indirectos de fabricación es de 1283 dólares americanos.

Capítulo VIII Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Se realizó un levantamiento técnico del estado actual del equipo, detallando las condiciones en las que se encontraba antes de realizar los respectivos mantenimientos correctivos, encontrando así todas las falencias y daños que tenía cada uno de los módulos del equipo y poder empezar con la recuperación energética y puesta a punto del equipo.
- En la recuperación energética y puesta a punto del túnel de aire multipropósito se resolvieron problemas de aislamiento, fugas y oxidación en los módulos de tubos lisos y con aletas, además de modificaciones en la estructura para poder ubicar la unidad de refrigeración debajo del túnel de aire y también para poder colocar en serie el módulo de resistencias eléctricas con los intercambiadores de calor de tubos lisos y aletas.
- La unidad de refrigeración se entrega en óptimas condiciones para su funcionamiento, en dicha unidad se resolvieron problemas de fugas de refrigerante por las válvulas, se cambió el aceite del compresor, se repararon las aletas de aluminio del condensador, se reemplazó el aislante del evaporador, se recargó el refrigerante R134a y se reemplazó el visor de nivel.
- Con respecto a la automatización y adquisición de datos del equipo, se diseñó un sistema de control y fuerza que nos permiten operar el módulo de resistencias y la unidad de refrigeración desde una PC, a través de la interfaz HMI realizada en LabView y con ayuda de un Arduino Mega2560 como microcontrolador para la adquisición de datos de temperatura y presión que se obtienen con un sensor de temperatura LM35 tipo sonda sumergible y un sensor de presión diferencial MPX5010DP, respectivamente.

- Se levantó información del equipo recuperada de manuales archivados en el laboratorio de Conversión de Energía, recabando información sobre las características técnicas del equipo.
- En el diseño de una solución mecánico-energética del equipo se realizó una serie de actividades correctivas individualmente para cada de los intercambiadores de calor, el módulo de resistencias, la unidad de refrigeración y los ventiladores el equipo.

Recomendaciones

- Para alargar la vida útil del equipo recuperado, se recomienda seguir el plan de mantenimiento que se entrega en los anexos.
- El agua con el que los equipos del laboratorio de Conversión de la Energía funcionan, no es agua tratada, se recomienda considerar la posibilidad de implementar un sistema centralizado de agua tratada para todos los equipos del laboratorio.
- Para reemplazar algún componente del tablero eléctrico, se recomienda hacer uso de los planos de control y fuerza que se encuentran en anexos, para que al reemplazarlo no exista inconvenientes.
- Antes de usar el equipo se recomienda se lea el manual de usuario que se encuentra en anexos.
- Para la realización de las prácticas de laboratorio se recomienda desplazar el equipo con precaución, para evitar cualquier golpe o daño.
- Se recomienda seguir implementando guías de laboratorio haciendo uso del ventilador axial.

Referencias

- Alvear, P. (09 de Abril de 2008). *Proyecto Arduino*. Obtenido de <https://proyectoarduino.com/arduino-mega-2560/>
- Anónimo. (2021). *National Instruments* . Obtenido de <https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>
- Calderón Neira, F. H. (2018). *IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS TIPO TÚNEL DE VIENTO PARA LA SELECCIÓN DE VENTILADORES DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS EN LA UPS CUENCA*. Cuenca.
- Cengel, Y. (2006). *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill.
- Cengel, Y. A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones* (cuarta ed.). México DF: Mc Graw Hill.
- Cóndor Vaca, A. (2008). *DISEÑO DE UN TUNEL DE AIRE PARA REALIZAR EXPERIMENTOS SOBRE AIRE ACONDICIONADO DE USO DOMÉSTICO E INDUSTRIAL*. Quito.
- García Mongue, P. J., & Maldonado Vasconez, R. M. (2008). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO POR CELDAS HÚMEDAS PARA EL TÚNEL MULTIPROPÓSITO DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA DE LA ESPE*. Sangolquí.
- Institucional, U. d. (s.f.). Obtenido de <http://www.espe.edu.ec/>
- Medrano Márquez, J. A., Gonzáles Ajuech, V. L., & Dias de León Santiago, V. M. (2017). *Mantenimiento Técnicas y aplicaciones industriales* (Vol. 1). Mexico: Patria.
- Rodríguez Machado, A. (2012). *Manual de Gestión de Mantenimiento*. Santa Clara.
- Super User. (28 de Septiembre de 2020). *Aner*. Obtenido de <https://www.aner.com/blog/mantenimiento-correctivo.html>
- TecQuipment. (s.f.). *The Multi-Purpose Air Duct and Associated Equipment* . Englad .