



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DE TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO DE
CONVECCIÓN FORZADA PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE
ENERGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

AUTORES: PAUCAR ROBLES, CARLOS ANDRÉS

WILCHEZ RAMÓN ALLEN EFRÉN

DIRECTOR: ING. VILLAVICENCIO POVEDA, ÁNGELO HOMERO MSc.

SANGOLQUÍ

2019



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO DE CONVECCIÓN FORZADA PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”* fue realizado por el Sr. *Paucar Robles, Carlos Andrés* y el Sr. *Wilchez Ramón, Allen Efrén* el mismo que a sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 05 de Diciembre del 2018

Ing. Ángelo, Villavicencio

DIRECTOR

C.C...1709338931



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Paucar Robles, Carlos Andrés*, y yo, *Wilchez Ramón, Allen Efrén*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación, “*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO DE CONVECCIÓN FORZADA PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE*” son de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 05 de Diciembre del 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'C. Paucar Robles', is positioned above the name of the author.

CARLOS ANDRÉS PAUCAR ROBLES

AUTOR

C.C. 1716758022

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Allen Efrén Wilchez Ramón', is positioned above the name of the author.

ALLEN EFRÉN WILCHEZ RAMÓN

AUTOR

C.C. 1721305454



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, *Paucar Robles, Carlos Andrés*, y yo, *Wilchez Ramón, Allen Efrén*, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación, "*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO DE CONVECCIÓN FORZADA PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE*" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 05 de Diciembre del 2018

CARLOS ANDRÉS PAUCAR ROBLES

AUTOR

C.C. 1716758022

ALLEN EFRÉN WILCHEZ RAMÓN

AUTOR

C.C. 1721305454

DEDICATORIA

“Solo vencíéndote vencerás”

Lucio Anneo Séneca

Este trabajo está dedicado a mis padres Carlos y Domitila quienes, con su amor, paciencia y esfuerzo, son pilares fundamentales en todos mis logros, me enseñaron a ser perseverante, paciente y que la familia lo es todo lo que se tiene. Los quiero mucho.

A mis hermanos Stepha, Brittany y Christopher, por estar siempre en mis mejores momentos y su apoyo incondicional en todas mis locuras, a mis abuelitos que me miran desde el cielo Abdón y Berta, a mi abuelita Hermelinda por brindarme siempre una sonrisa alentadora, a mi abuelito José siempre fuerte en las enseñanzas e historias compartidas, a mis primos que son como mis hermanos (chupitos), por enseñarme que la vida es para vivirla y compartirla en familia.

Carlos Andrés Paucar Robles

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres Alfredo y María Victoria quienes me supieron guiar, aconsejar a la distancia con todo su amor y paciencia quienes son pilares fundamentales en el día a día, los cuales con sus acciones se han convertido en un ejemplo para mí a seguir.

A mis hermanos Byron, Samantha, Juanfra y Cesar todo este esfuerzo es reflejo de todo su apoyo, consejos y reprimendas diarias, para seguir y no dejarse vencer por adversidades que se puedan presentar. A mi familia que a la distancia siempre se hace sentir con sus mensajes de cariño y apoyo en cada paso que doy.

Allen Efrén Wilchez Ramón

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por bendecirme con mis padres, son mi motor, mi apoyo incondicional y mi pilar fundamental, gracias por no rendirse nunca, gracias por sus enseñanzas y sobre todo gracias por su esfuerzo, porque desde pequeño me enseñaron a ver el mundo con amor y bondad, gracias por sacar siempre la familia adelante y por enseñarnos a mí y a mis hermanos todo lo bonito de la vida, gracias por quererme tanto. Mami, papi los quiero mucho y alégrese porque esto recién empieza.

A mi director de Proyecto de Titulación Ing. Ángel Villavicencio por darnos la confianza en el proyecto, además por su orientación, seguimiento y supervisión, que ha sido fundamental para la conclusión de este proyecto.

Gracias a los amigos laboratoristas de la universidad, Nelson Cárdenas, Roberty Velasco y Roberto Buenaño, sin su orientación, enseñanza y paciencia, el proyecto hubiese demorado más.

A Carlita por ser quien presionó mi paciencia y aceleró el tiempo de finalización de este proyecto, gracias a ti es en esta fecha. Te amo mucho mi amor.

A mi compañero de tesis Allen, gracias por formar un gran equipo y una gran amistad conmigo.

A la Universidad por brindarme todos los conocimientos y por permitirme conocer a grandes amigos de vida. De igual forma muchachos por falta de espacio, me queda decirles que mi gratitud es tan grande como su ausencia en estas páginas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios, por todas las bendiciones recibidas a lo largo de esta etapa, por la vida, por la salud y ser el soporte en momentos difíciles. Gracias por brindarme unos padres maravillosos que han sabido guiarme y tenerme paciencia.

Gracias a mis padres por su apoyo incondicional en cada momento de mi vida, gracias por el amor, consejos. Gracias por creer y apoyarme en cada decisión tomada, por estar siempre a mi lado, aunque sea a la distancia los amo mucho.

Gracias al Ing. Ángel Villavicencio por la confianza en el proyecto, por su orientación y consejos para culminarlo de la mejor forma.

Un agradecimiento especial a los laboratoristas de la universidad, Nelson Cárdenas, Roberty Velasco y Roberto Buenaño, que gracias a su paciencia, orientación y ayuda el proyecto de titulación pudo concluirse.

A Mavi por ser un gran apoyo y soporte no solo en el proyecto si no a diario dentro y fuera de las aulas, gracias por tanta paciencia y comprensión, gracias por presionarme para dar lo mejor de mí. Te amo.

A Carlitos, gracias por todo este tiempo trabajando juntos, pudimos no solo compartir conocimientos sino que también gratos momentos, gracias por tu amistad.

A la Universidad por brindarme todos los conocimientos y por permitirme formar grandes amistades. Amigos gracias por cada momento compartido en aulas como afuera de ellas.

INDICE DE CONTENIDO

Tabla de contenido

CERTIFICACIÓN	i
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
INDICE DE CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
1. CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	5
1.3. Justificación	5
1.4. Alcance	7
1.4.1. Componentes mecánicos	7
1.4.2. Componentes electrónicos / eléctricos	10
1.4.3. Componentes del sistema de control	11
1.4.4. Software para implementación, análisis y simulación	12
1.5. Objetivos	13
1.5.1. Objetivo General	13
1.5.2. Objetivos Específicos	13
1.6. Estructura del documento	14
2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	15
2.1. Procesos de transmisión de calor	15
2.1.1. Conducción	16
2.1.2. Convección	17
2.1.3. Radiación	20
2.2. El diseño en la ingeniería de sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos	21
2.2.1. Mecánica de fluidos	21
2.2.2. Sistemas eléctricos y electrónicos	31

2.3.	Acondicionamiento de sensores y actuadores	41
2.3.1.	Amplificación	42
2.3.2.	Atenuación	42
2.3.3.	Filtrado	42
2.3.4.	Aislamiento	43
2.3.5.	Excitación	43
2.3.6.	Linealización	43
2.3.7.	Compensación de la unión fría	44
2.3.8.	Terminación del puente	44
2.3.9.	Método de muestreo	44
2.4.	Controladores, diseño	45
2.4.1.	Control proporcional	45
2.4.2.	Control integral	47
2.4.3.	Control proporcional integral	48
2.4.4.	Control derivativo	50
2.4.5.	Control proporcional derivativo	52
2.4.6.	Control PID	52
3.	CAPÍTULO 3: DISEÑO MECATRÓNICO	54
3.1.	Despliegue de la función de calidad (QFD)	54
3.2.	Diseño del equipo	61
3.2.1.	Selección de material de estructura de soporte	61
3.2.2.	Selección de material de ducto, tolva y caja térmica	62
3.2.3.	Selección de material de turbuladores	63
3.2.4.	Selección del tipo de ventilador	65
3.2.5.	Selección de forma de niquelina	66
3.3.	Diseño mecánico	68
3.3.1.	Diseño de la estructura de soporte	68
3.3.2.	Diseño del ducto	73
3.3.3.	Diseño de caja térmica	75
3.3.4.	Diseño de turbulador de espigas	77
3.3.5.	Diseño de turbulador de aletas	83
3.3.6.	Diseño de turbulador de cara plana	85
3.4.	Diseño eléctrico / electrónico	87
3.4.1.	Dimensionamiento de dispositivos de potencia	87
3.4.2.	Circuito de potencia	89
3.4.3.	Dimensionamiento de dispositivos de control	91
3.4.4.	Circuitos de control	92
3.5.	Diseño sistema de control	93
3.5.1.	Control de temperatura	93
3.5.2.	Control de flujo	95
3.6.	Diseño HMI	96

3.7.	Topología de red.....	97
4.	CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN	98
4.1.	Máquinas y herramientas	98
4.1.1.	Máquinas	98
4.1.2.	Herramientas	98
4.1.3.	Instrumentos de medida	99
4.2.	Hojas de procesos.....	99
4.2.1.	Diagrama de flujo de construcción de la estructura soporte	101
4.2.2.	Diagrama de flujo de construcción del ducto.....	102
4.2.3.	Diagrama de flujo de construcción de la tolva.....	103
4.2.4.	Diagrama de flujo de construcción de la caja térmica	104
4.2.5.	Diagrama de flujo de construcción de turbulador de aletas	105
4.2.6.	Diagrama de flujo de construcción de turbulador de espigas.....	106
4.2.7.	Diagrama de flujo de construcción de turbulador de cara plana	107
4.3.	Construcción de circuito para sensores	107
4.4.	Construcción de circuito para control de temperatura de niquelina.....	108
4.5.	Implementación del HMI	108
4.5.1.	Ventana de “INICIO”.....	109
4.5.2.	Ventana de menú general “Menu_Profesor”.....	109
4.5.3.	Ventana de configuración “Control_Profesor”	110
4.5.4.	Ventana de monitoreo “Monitoreo”.....	111
4.5.5.	Ventana de dador “Datos_Est”.....	111
4.6.	Implementación de red	112
5.	CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y RESULTADOS.....	113
5.1.	Ecuaciones utilizadas para cálculos	113
5.2.	Desarrollo de protocolo de pruebas.....	115
5.3.	Pruebas y resultados del equipo en general.....	116
5.3.1.	Turbulador de espigas	116
5.3.2.	Turbulador de aletas	124
5.3.3.	Turbulador de cara plana.....	126
5.4.	Validación de resultados	128
5.5.	Análisis económico y financiero	130
5.5.1.	Materiales	130
5.5.2.	Elementos y accesorios	131
5.5.3.	Costo de fabricación.....	132
6.	CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	134
6.1.	Conclusiones	134

6.2.	Recomendaciones.....	135
7.	CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Tabla de conductividades térmicas para algunos materiales a temperatura ambiente. .</i>	17
Tabla 2	<i>Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.....</i>	19
Tabla 3	<i>Listado de necesidades del Laboratorio de Energías.</i>	54
Tabla 4	<i>Actividades a realizar para satisfacer necesidades y requerimientos planteados.....</i>	55
Tabla 5	<i>Relaciones entre requerimientos y actividades.</i>	56
Tabla 6	<i>Comparación entre equipo propuesto y equipos existentes en el mercado.</i>	57
Tabla 7	<i>Radio de mejora a proponer, e importancia de cada necesidad.</i>	59
Tabla 8	<i>Orden de importancia de parámetros a tomar en cuenta durante el diseño.</i>	60
Tabla 9	<i>Tabla comparativa selección de material de estructura de soporte.</i>	61
Tabla 10	<i>Matriz de calificación de material para estructura soporte.</i>	62
Tabla 11	<i>Matriz de calificación de material de ducto, tolva y caja termica.</i>	63
Tabla 12	<i>Tabla comparativa selección de material de turbuladores.....</i>	64
Tabla 13	<i>Matriz de calificación de material para turbuladores.</i>	64
Tabla 14	<i>Tabla comparativa selección de tipo de ventilador.</i>	65
Tabla 15	<i>Matriz de calificación de tipo de ventilador.</i>	66
Tabla 16	<i>Tabla comparativa selección de forma de niquelina.</i>	67
Tabla 17	<i>Matriz de calificación de forma de niquelina.</i>	67
Tabla 18	<i>Pesos que actúan sobre la estructura soporte.</i>	68
Tabla 19	<i>Dimensiones de equipos similares.</i>	74
Tabla 20	<i>Características de ventilador AC seleccionado.</i>	87
Tabla 21	<i>Características de niquelina seleccionada.</i>	88
Tabla 22	<i>Características de dimmer comercial seleccionado.</i>	89
Tabla 23	<i>Materiales utilizados en el circuito de control de niquelina.</i>	90
Tabla 24	<i>Características de termocupla seleccionada.</i>	91
Tabla 25	<i>Características de microcontrolador seleccionado.</i>	91
Tabla 26	<i>Elementos utilizados en el circuito de sensores de temperatura.</i>	92
Tabla 27	<i>Valores de temperatura controlado con turbulador de cara plana.</i>	93
Tabla 28	<i>Valores de temperatura controlado con turbulador de aletas.</i>	94
Tabla 29	<i>Valores de temperatura controlado con turbulador de espigas.</i>	94
Tabla 30	<i>Valores de flujo de ventilador dentro del ducto controlado</i>	95
Tabla 31	<i>Valores de propiedades de aire a presión atmosférica.</i>	113
Tabla 32	<i>Resultados prueba 1 con turbulador de espigas.</i>	118
Tabla 33	<i>Resultados prueba 2 con turbulador de espigas.</i>	119
Tabla 34	<i>Resultados prueba 3 con turbulador de espigas.</i>	119
Tabla 35	<i>Resultados prueba 4 con turbulador de espigas.</i>	120
Tabla 36	<i>Resultados prueba 5 con turbulador de espigas.</i>	121
Tabla 37	<i>Resultados prueba 6 con turbulador de espigas.</i>	121
Tabla 38	<i>Resultados prueba 7 con turbulador de espigas.</i>	122

Tabla 39	<i>Resultados prueba 8 con turbulador de espigas.</i>	122
Tabla 40	<i>Resultados prueba 9 con turbulador de espigas.</i>	123
Tabla 41	<i>Resultados prueba 1 con turbulador de aletas.</i>	124
Tabla 42	<i>Resultados prueba 2 con turbulador de aletas.</i>	125
Tabla 43	<i>Resultados prueba 3 con turbulador de aletas.</i>	125
Tabla 44	<i>Resultados prueba 1 con turbulador de cara plana.</i>	126
Tabla 45	<i>Resultados prueba 2 con turbulador de cara plana.</i>	127
Tabla 46	<i>Resultados prueba 3 con turbulador de cara plana.</i>	127
Tabla 47	<i>Validación de ingresados y obtenidos.</i>	128
Tabla 48	<i>Comparación de resultados.</i>	129
Tabla 49	<i>Costo de materiales.</i>	130
Tabla 50	<i>Costo de elementos y accesorios.</i>	131
Tabla 51	<i>Costo de uso de máquinas herramientas</i>	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Unidad de transferencia de calor por convección libre y forzada HT19	2
Figura 2	Unidad de transferencia de calor por convección libre y forzada, TCLFC.	2
Figura 3	IT 03.2 Transmisión de calor por convección natural y forzada	3
Figura 4	WL 440 de Gunt Hamburg.	4
Figura 5	TC-KT-400/PE de Generatoris.	4
Figura 6	Diseño del HMI del Equipo didáctico de convección forzada con sistema de control centralizado	5
Figura 7	Componentes mecánicos.	8
Figura 8	Componentes electrónicos / eléctricos.	10
Figura 9	Componentes del sistema de control	11
Figura 10	Software para implementación, análisis y simulación.	12
Figura 11	Tres tipos de transferencia de calor.	16
Figura 12	Convección forzada.	18
Figura 13	Convección natural.	18
Figura 14	Gráfica representativa del esfuerzo cortante y velocidad de cizalladura en un fluido.	26
Figura 15	Esfuerzo frente a velocidad de cizalladura para diversos tipos de fluidos no newtonianos independientes del tiempo.	26
Figura 16	Esfuerzo frente a velocidad de cizalladura para las dos clases de fluidos no newtonianos, dependientes del tiempo, pero no elásticos.	27
Figura 17	Clasificación del fluido y del flujo según su densidad, viscosidad y régimen de flujo.	29
Figura 18	Flujo laminar sobre un perfil de automóvil, se ha introducido o inyectado filamentos de tinta para visualizar la trayectoria del flujo.	30
Figura 19	Representación de movimiento aleatorio de partículas de un fluido en un flujo turbulento.	31
Figura 20	Código de colores para la identificación de resistencias de 4 bandas.	34
Figura 21	Condensador elemental.	35

Figura 22 Bobinas con núcleo toroide.	36
Figura 23 Tamaño de pilas encontradas en el mercado.	37
Figura 24 Interruptores electrónicos.	37
Figura 25 Ley de nodos o de corrientes.	39
Figura 26 Ley de mallas o de voltaje.	40
Figura 27 Control proporcional.	46
Figura 28 Sistema con control proporcional.	46
Figura 29 Control integral.	47
Figura 30 Sistema con control integral.	48
Figura 31 Control proporcional integral.	49
Figura 32 Salida controlador proporcional integral.	49
Figura 33 Control derivativo ante una entrada de señal tipo rampa.	51
Figura 34 Control derivativo.	51
Figura 35 Control proporcional derivativo.	52
Figura 36 Control PID.	53
Figura 37 Simulación CAE de estructura soporte.	69
Figura 38 Diagrama de viga empotrada en ambos extremos.	70
Figura 39 Gráfica de cortante en estructura de soporte.	71
Figura 40 Gráfico de momento flector en estructura soporte.	72
Figura 41 Sección de tubo cuadrado para estructura de soporte.	72
Figura 42 Diseño de caja pequeña de caja térmica.	76
Figura 43 Diseño de caja grande de caja térmica.	76
Figura 44 Diseño de caja térmica total.	77
Figura 45 Tipos de distribución de espigas.	78
Figura 46 Distribución 1.	78
Figura 47 Distribución 2.	79
Figura 48 Selección de configuración de diseño.	80
Figura 49 Distribución escalonada.	80
Figura 50 Vista isométrica de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de espigas.	81
Figura 51 Vista frontal de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de espigas.	82
Figura 52 Vista frontal con acercamiento de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de espigas.	82
Figura 53 Diseño de turbulador de espigas.	83
Figura 54 Vista isométrica de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de aletas.	84
Figura 55 Vista frontal de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de aletas.	84
Figura 56 Vista frontal con acercamiento de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de aletas.	85
Figura 57 Diseño de turbulador de aletas.	85
Figura 58 Vista isométrica de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de cara plana.	86
Figura 59 Vista frontal de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de cara plana.	86

Figura 60 Diseño de turbulador de cara plana.	87
Figura 61 Diagrama eléctrico de dimmer comercial utilizado.	89
Figura 62 Diagrama de circuito de control de niquelina.	90
Figura 63 Diagrama de circuito de conexión de sensores.	93
Figura 64 Diagrama de arquitectura y navegación del HMI.	96
Figura 65 Topología de red del equipo para compartir datos.	97
Figura 66 Simbología ASME para hoja de procesos por diagrama de flujo.	100
Figura 67 Diagrama de flujo - Estructura soporte.	101
Figura 68 Diagrama de flujo - Ducto.	102
Figura 69 Diagrama de flujo - Tolva.	103
Figura 70 Diagrama de flujo - Caja térmica.	104
Figura 71 Diagrama de flujo – turbulador de aletas.	105
Figura 72 Diagrama de flujo - turbulador de espigas.	106
Figura 73 Diagrama de flujo - Turbulador de cara plana.	107
Figura 74 Diseño PCB de sensores.	107
Figura 75 Diseño PCB de control de la niquelina.	108
Figura 76 Ventana de Inicio.	109
Figura 77 Ventana de menú general.	110
Figura 78 Ventana de configuración.	110
Figura 79 Ventana de monitoreo.	111
Figura 80 Ventana de datos.	112
Figura 81 Ventana de monitoreo en prueba 1.	117
Figura 82 Ventana de datos en prueba 1.	118

RESUMEN

Las prácticas de convección forzada son de gran interés, ya que así se puede reproducir de una manera más didáctica la teoría recibida en clases, esta es una de las razones por las cuales encontramos equipos direccionados para ser ayuda en el estudio de este modo de transferencia de calor. Los nuevos avances tecnológicos permiten crear y modernizar equipos que colaboran en el ámbito educativo, el presente trabajo tuvo como objetivo la construcción total de un equipo automatizado de convección forzada y tener en un ordenador los datos necesarios para poder determinar datos relevantes del tema, como lo son, el número de Reynolds, número de Nusselt, coeficiente de transferencia de calor, cantidad de calor transferido, además interpolaciones de datos importantes como Prandt, viscosidad cinemática, conductividad térmica del fluido; orientado a la disminución de tiempos de práctica. Permitiendo variar parámetros de entrada para realizar prácticas a diferentes condiciones, como es variar la velocidad de entrada del aire, voltaje para calentamiento de la caja térmica, además se puede intercambiar los turbuladores dependiendo del estudio que se desea realizar. Se realizaron pruebas en tres diferentes turbuladores, de espigas, aletas y cara plana, obteniendo, así como resultado que el turbulador de espigas es el mejor método para transferir calor y generar un flujo turbulento.

PALABRAS CLAVES:

- **TRANSFERENCIA DE CALOR,**
- **CONVECCIÓN FORZADA,**
- **AUTOMATIZACIÓN,**
- **TURBULADOR.**

ABSTRACT

Forced convection practices are of great interest, since this way the theory received in classes can be reproduced in a more didactic way; this is one of the reasons why we find equipment aimed to help in the study of this mode of transfer of heat. The new technological advances allow creating and modernizing equipment that support in the educational field. The objective of this work was the construction of an automated forced convection machine and to maintain a database that would help determine relevant data of the subject, such as are, the Reynolds number, Nusselt number, heat transfer coefficient, amount of heat transferred, plus interpolations of important data such as Prandtl, kinematic viscosity, thermal conductivity of the fluid; oriented to the reduction of practice times. Allowing the variation of input parameters to perform practices at different conditions, such as the speed of air intake and voltage for heating the thermal box; in addition you can interchange the tabulators depending on the study you want to perform. Tests were carried out in three different turbulators; these are spindle, flat-faced and plate fin, obtaining, as well as result that the spindle turbulator is the best method to transfer heat and generate a turbulent flow.

KEYWORDS:

- **HEAT TRANSFER,**
- **FORCED CONVECTION,**
- **AUTOMATED,**
- **TURBULATOR.**

1. CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1. Introducción

La transferencia de calor se define como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas, es decir siempre que exista una diferencia de temperatura en un cuerpo o entre cuerpos está presente una transferencia de calor, nos podemos referir como modos de transferencia de calor a la conducción, radiación y a la convección, siendo este último de nuestro interés, la convección se refiere a la transferencia de calor que ocurre entre una superficie y un fluido en movimiento cuando estas presentan diferentes temperaturas. (Incropera & DeWitt, 1999)

Las prácticas de convección son de gran interés, ya que así se puede reproducir de una manera más didáctica la teoría recibida en clases, esta es una de las razones por las cuales encontramos equipos direccionados para ser ayuda en el estudio de este modo de transferencia de calor. Los nuevos avances tecnológicos permiten crear y modernizar equipos que colaboran en el ámbito educativo. Como por ejemplo la Unidad de transferencia de calor por convección libre y forzada de Armfield que se puede apreciar en la Figura 1 la cual facilita el estudio de los perfiles de temperatura y flujo de calor en tres superficies de transferencia de calor diferentes. (Armfield, 2017)



Figura 1 Unidad de transferencia de calor por convección libre y forzada HT19

Fuente: (Armfield, 2017)

Así también tenemos el equipo diseñado por Edibon que se muestra en la Figura 2, la Unidad de transferencia de calor por convección libre y forzada controlada por un computador, el cual permite estudiar el rendimiento de distintos turbuladores, analizando los coeficientes de transmisión de calor de cada uno de los turbuladores expuestos a diferentes caudales de aire un ventilador situado en la parte superior del túnel, permite controlar el caudal de aire que atraviesa el túnel, una caja de interface de control conectado a un computador, contiene circuitos de control para la medición de la temperatura, control eléctrico, además posee una interface el que se muestran datos reales de la medición realizada por el equipo. (Edibon INTERNATIONAL, 2014)



Figura 2 Unidad de transferencia de calor por convección libre y forzada, TCLFC.

Fuente: (Edibon INTERNATIONAL, 2014)

El equipo IT 03.2 el cual podemos observar en la Figura 3 es un equipo de sobremesa muy útil para el estudio de la transferencia de calor por convección natural o forzada, el funcionamiento del equipo consiste en hacer pasar aire por un conducto, que se calienta utilizando elementos calefactantes con diferentes superficies geométricas, para el estudio de la convección forzada se intercala un ventilador, el equipo se suministra con un ordenador. (DIKOIN INGENIERÍA S.L., 2017)



Figura 3 IT 03.2 Transmisión de calor por convección natural y forzada

Fuente: (DIKOIN INGENIERÍA S.L., 2017)

El WL440 de GUNT HAMBURG que podemos observar en la Figura 4, permite realizar ensayos fundamentales destinados a la docencia específica de la convección libre y forzada en diferentes elementos de calefacción. El equipo de ensayo se articula en torno a un conducto de aire vertical, en el que se colocan diferentes elementos de calefacción. El conducto de aire se ubica encima de un soplante axial. El soplante se encarga de aspirar aire del ambiente y transportarlo a través del ducto de aire, el aire pasa por un elemento de calefacción, absorbiendo calor en este proceso. (Gunt Hamburg, 2017)



Figura 4 WL 440 de Gunt Hamburg.

Fuente: (Gunt Hamburg, 2017)

El equipo TC-KT-400/PE diseñado por Generatoris S.A de C.V. que podemos observar en la Figura 5 realiza los estudios de intercambios térmicos por medio del fenómeno de convección natural y forzada, además de los gradientes de temperatura de acuerdo con diferentes niveles transferencia. (Generatoris, 2017)



Figura 5 TC-KT-400/PE de Generatoris.

Fuente: (Generatoris, 2017)

A nivel nacional podemos encontrar el trabajo de investigación realizado en la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, involucra la transferencia de calor por convección forzada en el cual interviene un flujo interno, como principal factor el diseño y construcción de un equipo, que brinde la facilidad de estudiar el comportamiento del coeficiente de película en estado

estable; destinado a prácticas en laboratorios de transferencia de calor, como podemos observar en la Figura 6 el diseño del HMI del equipo. (Larco, 2014)

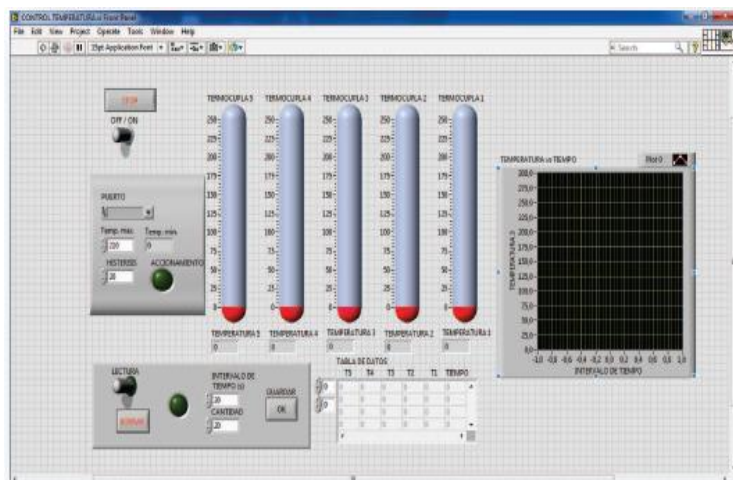


Figura 6 Diseño del HMI del Equipo didáctico de convección forzada con sistema de control centralizado

Fuente: (Larco, 2014)

1.2. Planteamiento del problema

En el Laboratorio de Conversión de Energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, no cuenta con un equipo en condiciones adecuadas que permita realizar prácticas de convección forzada, ya que el equipo que se encuentra en el laboratorio debió ser modernizado o sustituido, para mantener un laboratorio actualizado en términos tecnológicos, por tal motivo el equipo existente se encuentra obsoleto.

1.3. Justificación

La transferencia de calor es bastante común en los procesos industriales, por tal motivo la importancia del estudio de estos, ya que, cualquier dispositivo que genere calor para que pueda

funcionar adecuadamente, debe intercambiar calor con una fuente y por lo menos un depósito de energía térmica. Por lo tanto es necesario que el estudiante comprenda como ocurren estas interacciones energéticas, que factores influyen en ellas y como optimizar tales interacciones, dando así espacio a la investigación de este tipo de energías, lo que se va a lograr con el equipo automatizado de convección a diseñar e implementar, es un mejor entendimiento de la transferencia de calor por convección, comprendiendo y aplicando de mejor manera los conocimientos adquiridos en clase para realizar diseños optimizados en relación a este tipo de transferencia de energía.

Los ejercicios dentro de laboratorios son usados como métodos prácticos y eficaces en los procesos de enseñanza, de manera que los estudiantes puedan aprender mediante la experimentación y reforzar los conocimientos adquiridos. Básicamente, todas las grandes ciencias de nuestro tiempo se han consolidado con el respaldo de los laboratorios, y actualmente gozan de una plenitud sin precedentes gracias a equipos existentes en estos espacios de cultivo de conocimiento.

La modernización de laboratorios universitarios, es necesaria para una adaptación a la evolución del medio en el cual compiten las universidades por superarse nacional e internacionalmente, formando así profesionales adaptables a cualquier medio laboral al que se enfrenten, demostrando su formación y manteniendo el prestigio del centro educativo que los formó, además en la modernización de los laboratorios esta implícitamente la aplicación de los avances tecnológicos adquiridos dentro de la propia universidad, permitiendo así la colaboración de sus estudiantes para llevar los laboratorios a un nivel más competitivo.

1.4. Alcance

El proyecto propuesto permitirá realizar 12 prácticas de laboratorio específicas sobre convección forzada, permitiendo ampliar los conocimientos adquiridos en clase de los estudiantes, esto se realizará gracias a un sistema de adquisición y procesamiento de datos obtenidos por varios sensores del equipo en funcionamiento, además gracias al ingreso de datos, será posible conocer la cantidad de flujo y temperatura que nos pueden brindar los actuadores del equipo.

A su vez, por medio de algoritmos matemáticos existentes, es posible calcular en tiempo real el calentamiento y condiciones del flujo que atraviesen el equipo, permitiendo así observar y entender de mejor manera la teoría de convección forzada.

Entre los algoritmos para determinar todo lo indicado anteriormente se utilizará como guía didáctica el libro “FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR”, el cual nos indica varios métodos matemáticos para obtener parámetros importantes en el estudio de la convección forzada.

A continuación, se describe los distintos componentes que formaran parte de este proyecto de titulación.

1.4.1. Componentes mecánicos

En la Figura 7, se enlista los componentes mecánicos que intervienen en el proyecto propuesto.

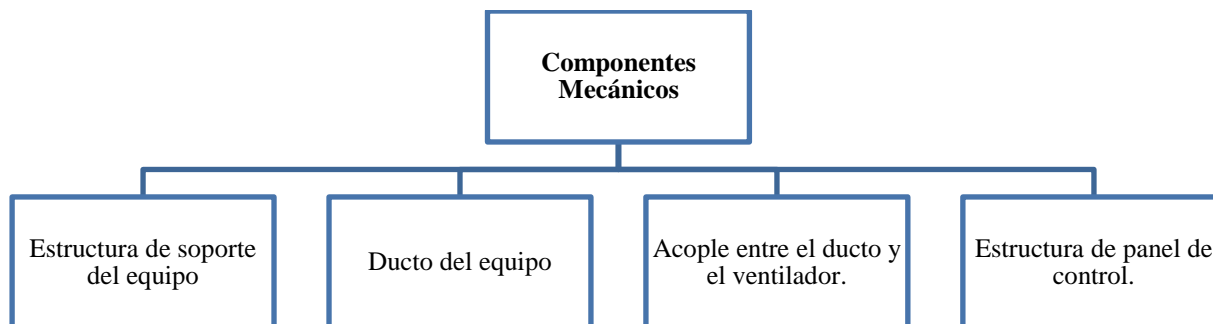


Figura 7 Componentes mecánicos.

1.4.1.1. Estructura de soporte del equipo

La estructura de soporte del equipo será diseñada y construida basándose en conceptos de estática y diseño de elementos, considerando diferentes parámetros de diseño, los cuales varían dependiendo de la cantidad de flujo que se desee pasar utilizando el ventilador, ya que esto nos genera una vibración del equipo. Los conceptos considerados para el desarrollo de este prototipo serán los siguientes:

- Diseño y planos de estructura de soporte
- Selección de materiales de estructura de soporte
- Estructura de soporte construido

1.4.1.2. Ducto del equipo

El ducto será diseñado y construido basándose en equipos que cumplen los objetivos requeridos para nuestro proyecto, por lo que en el diseño se consideraran varios parámetros, los cuales dependen de la cantidad de sensores que llevara el equipo y la ubicación de estos, de igual manera la ubicación de los actuadores deberá ser analizada y seleccionada de tal manera que facilite el mantenimiento y cambio de módulos calentadores del equipo.

- Diseño y planos del ducto

- Selección de materiales del ducto
- Ducto construido
- Manual de mantenimiento

1.4.1.3. Acople entre el ducto y el ventilador

El acople será diseñado y construido de tal manera que permita el paso del flujo al ducto uniformemente, para lo cual nos basaremos en las dimensiones del ventilador y el ducto de tal manera que el flujo alcance la velocidad requerida para cada experimento a realizar dentro del equipo.

- Diseño y planos del acople entre el ducto y el ventilador
- Selección de materiales del acople
- Acople construido

1.4.1.4. Estructura de panel de control

La estructura del panel de control será diseñada y construida en base a la cantidad de sensores necesarios en el equipo, y será utilizado como protección de cableado y circuitería del equipo, además nos facilitará la conexión entre los diferentes elementos del equipo como son sensores, tarjeta de adquisición de datos y computador con HMI.

- Diseño y planos de caja estructura de control
- Selección de materiales de caja estructura de control
- Construcción de caja estructura de control

1.4.2. Componentes electrónicos / eléctricos

En la Figura 8 se enlista los componentes electrónicos y eléctricos a ser realizados en el proyecto propuesto.

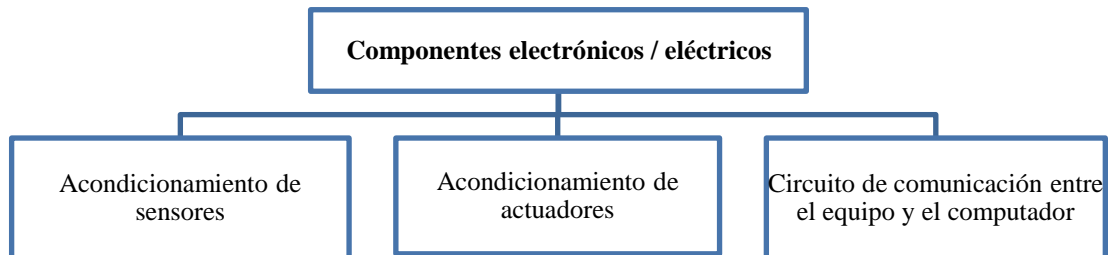


Figura 8 Componentes electrónicos / eléctricos.

1.4.2.1. Acondicionamiento de sensores

Se realizará circuitos acondicionadores para los sensores dentro del equipo como son los de temperatura, con lo cual se podrá realizar mediciones que nos entreguen señales aceptables en la recepción de estas, para su posterior análisis, los cuales serán diseñados e implementados en placas PCB, para luego ser colocados en la caja estructura de panel de control.

- Diseño y planos de circuitos de acondicionamiento de sensores
- Tabla de materiales de los circuitos de acondicionamiento
- Placas realizadas en PCB

1.4.2.2. Acondicionamiento de actuadores

Se realizará circuitos acondicionadores para los actuadores del equipo como lo son el calentador y el ventilador, de tal manera que puedan ser acoplados con facilidad al sistema, también ser controlados de una manera más precisa, exacta y rápida. También serán colocados dentro de la caja estructura de panel de control para conservar su buen estado y así tener un correcto funcionamiento del equipo.

- Diseño y planos de circuitos de acondicionamiento de actuadores
- Tabla de materiales de los circuitos de acondicionamiento
- Placas realizadas en PCB

1.4.2.3. Circuito de comunicación entre el equipo y el computador

El circuito de comunicación nos permitirá el enlace de señales entre el equipo y el computador, logrando así un equipo controlado desde el HMI colocado en el computador. Este circuito también será colocado dentro de la caja estructura de panel de control para conservarlo en buen estado y poder brindar un buen funcionamiento del equipo.

1.4.3. Componentes del sistema de control

Con el sistema de control se propone:

- Lectura de señales de sensores de temperatura y flujo
- Implementación de algoritmo para cálculo de variables necesarias en las prácticas a realizar.
- Implementación de algoritmo de control de actuadores para mantener estabilidad y otorgar variables estables.

En la Figura 9 se describe los componentes del sistema de control a ser utilizados en el proyecto propuesto.

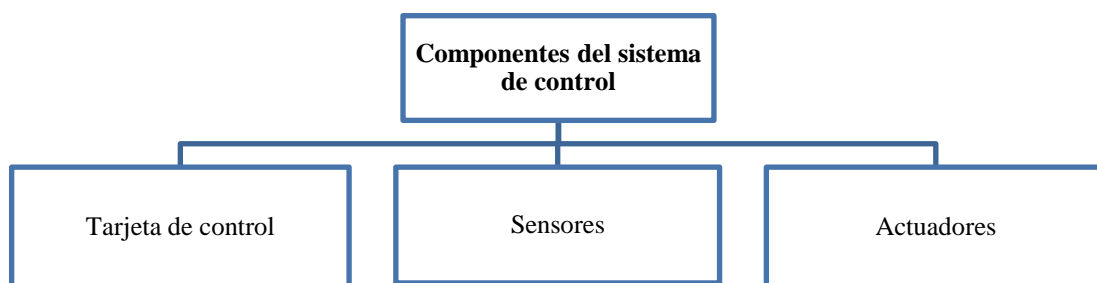


Figura 9 Componentes del sistema de control

1.4.3.1. Tarjeta de control

La tarjeta de control será seleccionada del mercado tomando en cuenta las especificaciones necesarias en el diseño del equipo, además nos ayudará con la conexión y comunicación entre el equipo y el computador.

1.4.3.2. Sensores

Se utilizarán 9 sensores de temperatura tipo “K”, los cuales deberán trabajar hasta una temperatura de 500° C.

1.4.3.3. Actuadores

Se utilizará calentadores intercambiables diseñados con resistencias de calentamiento de 515 W para el equipo y un ventilador de velocidad variable, controlado desde un computador que genere un flujo de aire a través del túnel en un rango de 0 – 4300 l/min.

1.4.4. Software para implementación, análisis y simulación

En la Figura 10 se describe los softwares para implementación, análisis y simulación a ser utilizados en el proyecto propuesto.

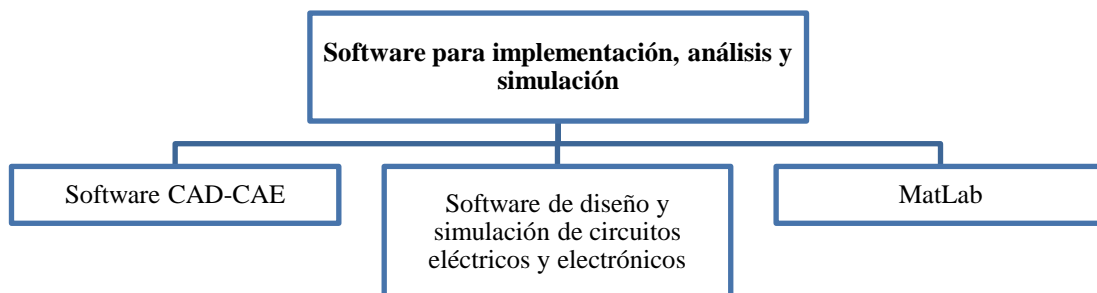


Figura 10 Software para implementación, análisis y simulación.

1.4.4.1. Software CAD - CAE

Estos softwares serán utilizados para el diseño mecánico de elementos o partes del equipo, además se puede realizar simulación de cargas estáticas y flujo a través de placas.

1.4.4.2. Software de diseño y simulación de circuitos eléctricos y electrónicos

Este software será utilizado para el diseño electrónico y eléctrico de los circuitos del equipo, además se puede diseñar la forma física a ser implementada en una placa PCB, permitiendo la simulación de circuitos para evitar posibles fallos de diseño.

1.4.4.3. MatLab

Este software será utilizado para el procesamiento de datos obtenidos por los sensores, además nos permitirá el diseño de controladores para los actuadores a utilizar en el equipo, también nos ayudará en la implementación del HMI la cual indicará valores obtenidos en cada práctica y podrá controlar los actuadores del equipo a disposición del usuario.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Realizar el diseño y construcción de un equipo automatizado de convección forzada para el laboratorio de conversión de energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Realizar el diseño mecatrónico de la estructura de soporte del ducto de aire, del ducto de aire y de los turbuladores.
- Diseñar una placa PCB que contenga el circuito de potencia, circuito de sensores y actuadores, y circuito de acondicionamiento de señales.
- Implementar un HMI en un ordenador que gobierne toda la funcionalidad del equipo y muestre el estado de este.

1.6. Estructura del documento

La estructura del documento está dividida en las distintas fases que tomara el proyecto a lo largo de su realización teniendo así:

El capítulo dos, tratara lo referente a un marco teórico sobre los temas de importancia para este proyecto, tratando fórmulas, teoremas, leyes, normas, etc.

El capítulo tres, estará referenciado a la parte de un diseño mecatrónico dividiendo este en diseño mecánico, diseño eléctrico/electrónico, diseño del sistema de control como también el diseño del interfaz humano/maquina.

Una vez concluido el capítulo tres se presenta la fase de construcción e implementación del equipo automatizado de convección forzada que abarca nuestro capítulo cuatro, que es acoplar la parte mecánica, eléctrica/electrónica, instrumentación y control.

Entrado así una vez concluido este capítulo a la fase de pruebas y resultados del equipo, permitiendo así elaborar el manual de usuario del equipo como también las guías de prácticas que el estudiante podrá realizar, así permitiendo llegar a las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Procesos de transmisión de calor

La transferencia de calor se refiere a la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura en un sistema determinado.

Siempre que exista una diferencia de temperatura entre cuerpos o en un cuerpo, existirá una transferencia de calor.

Nos referimos a los diferentes tipos de procesos de transferencia de calor dependiendo del modo en el que ocurre, cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario, como puede ser un sólido o un fluido, lo llamamos conducción para referirnos a la transferencia de calor que se producirá a través del medio. En cambio, el término convección refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando estén a diferente temperatura. El último modo o forma de transferencia de calor se denomina radiación, la cual nos indica que todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas, por lo que, en ausencia de un medio, existe una transferencia de calor neta por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas. (Incropera F. P., 1999)

En la Figura 11 podemos observar los tres tipos de transferencia de calor revisados en brevedad anteriormente, para una mejor comprensión de los detallados.

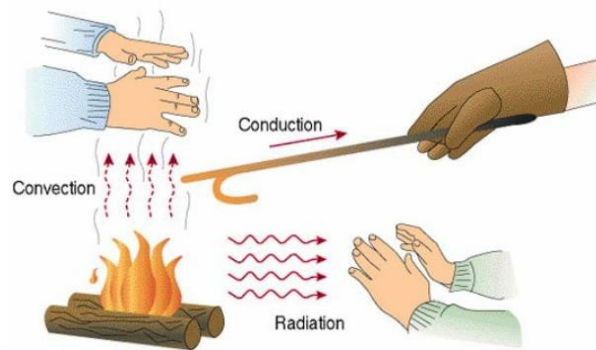


Figura 11 Tres tipos de transferencia de calor.

Fuente: (NERGIZA, 2013)

2.1.1. Conducción

Es un modo de propagación de energía por difusión o por contacto directo como resultado de un gradiente de temperatura.

En general el proceso se encuentra gobernado por la Ley de Fourier, en donde tenemos que el flujo de calor depende de la naturaleza del material y de la temperatura a la que se encuentre el mismo, siempre que esté en estado estacionario, y se define como:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

Donde:

q_x : Flujo de calor en la dirección x (W)

k : Conductividad térmica (W/mK)

A : Área normal en dirección al flujo de calor (m^2)

dT : Diferencial de temperatura en dirección x (K)

dx : Diferencial de posición en la dirección x (m)

Es importante la presencia del signo negativo en la ecuación, ya que indica que el calor debe fluir de mayor a menor temperatura de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica. (Levenspiel, 1993)

Los valores promedio de la conductividad k se establecen en la Tabla 1 para algunos materiales.

Tabla 1

Tabla de conductividades térmicas para algunos materiales a temperatura ambiente.

Material	K, W/m.K	Material	K, W/m.K
Gases		Sólidos	
SO_2	0,009	Espuma de poliestireno	0,036
CO_2, H_2	0,018	Cartón acanalado	0,064
H_2O	0,025	Papel	0,13
Aire	0,026	Arena seca	0,33
Líquidos		Vidrio	0,35 – 1,3
Gasolina	0,13	Hielo	2,2
Etanol	0,18	Plomo	34
Agua	0,61	Acero	45
Mercurio	8,4	Aluminio	204
Sodio	85	Cobre	380

Fuente: (Levenspiel, 1993)

2.1.2. Convección

Es un modo de transporte de energía que se debe al movimiento de un fluido, gas o líquido alrededor o a través de una superficie, en donde la velocidad del fluido está directamente relacionada con la transferencia de calor. Existen dos tipos de transferencia de calor o energía por convección, que dependen de la naturaleza del movimiento del fluido, los cuales son conocidos como: convección natural y convección forzada. (Larco, 2014)

2.1.2.1. Convección forzada

Este modo de transferencia de energía o calor se da cuando un fluido atraviesa un sistema debido a la acción de agente externo como se observa en la Figura 12 los cuales pueden ser generados por ventiladores, bombas, o agentes meteorológicos, es así que el factor primordial son

los gradientes de presión. Para el estudio de este proceso son comúnmente utilizados números adimensionales tales como Nusselt, Prandtl y Reynolds. (Levenspiel, 1993)

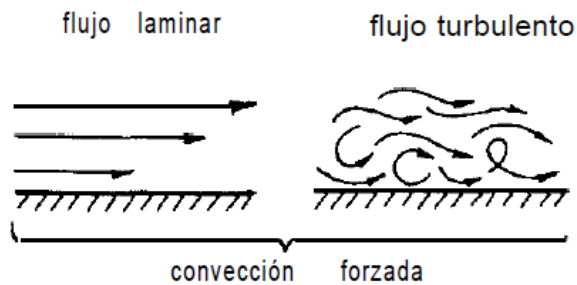


Figura 12 Convección forzada.

Fuente: (Levenspiel, 1993, pág. 166)

2.1.2.2. Convección libre

El movimiento de un fluido es generado por acción de fuerzas de empuje que actúan sobre él, por tal motivo su densidad disminuye, con la presencia de un gradiente de temperatura, se produce dentro de un campo gravitacional al estar en contraste alrededor de una superficie, como se observa en la Figura 13

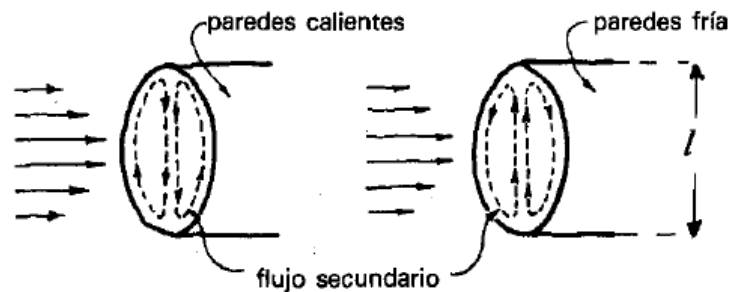


Figura 13 Convección natural.

Fuente: (Levenspiel, 1993, pág. 176)

En general la convección forzada como la natural están determinadas por la ley de enfriamiento de Newton, la misma que define al coeficiente local de transferencia de calor h , el cual varía a lo largo de toda la superficie.

$$q = \bar{h}A(T_s - T_\infty)$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor (W/m^2K)

T_s : Temperatura de la superficie ($^{\circ}C$)

T_{∞} : Temperatura del fluido ($^{\circ}C$)

T_s : Diferencial de temperatura en dirección x (K)

A : Área de transferencia de calor por convección (m^2)

Para determinar el coeficiente de película h , aparecen varios conceptos como capa límite hidrodinámica, la cual es una región del fluido en donde existen fuerzas viscosas, y así se produce una diferencia de velocidades, desde cero en la superficie aumentando hasta prácticamente una velocidad infinita en el fluido; la capa límite térmica es una región del fluido donde existe diferencia de temperaturas dado por el resultado de una transferencia de calor entre la superficie y el fluido; en la determinación de estos valores de capa límite intervienen factores tales como; naturaleza del fluido, fuerza de corte, fuerza viscosa, flujo de masa por lo que se recurre a tablas preestablecidas para dicho valor, como se observa en la Tabla 2. (Incropera F. P., 1999)

Tabla 2

Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Tipo de convección	$h(W/m^2^{\circ}C)$
Convección libre de gases	2 – 25
Convección libre de líquidos	10 – 1000
Convección forzada de gases	25 – 250
Convección forzada de líquidos	50 – 20000
Ebullición y condensación	2500 – 100000

Fuente: (Cengel, 2011, pág. 26)

2.1.3. Radiación

La radiación térmica diferencia de la luz visible, rayos X y ondas de radio, solo por las longitudes de onda que poseen cada una de estas, ya que son muy similares. El ojo humano puede percibir radiación electromagnética dentro de un rango de 35 a 75 micras. Un cuerpo emite la radiación electromagnética por la acción de la temperatura que posee este.

Las ondas de radio poseen aproximadamente una longitud de onda de 10^{-4} micras, mientras que la longitud de onda de los rayos X suele ser de 0.01 a 1 micra, y la radiación térmica suele ocurrir en radios desde 0.1 a 100 micras. Para que la transferencia de energía por radiación se transporte, no es necesario un medio.

Todos los cuerpos sólidos, líquidos y los gases emiten radiación térmica. A nivel macroscópico la radiación térmica está basada en el cálculo de la ley de Stefan Boltzmann, la cual relaciona el flujo de energía que emite un cuerpo ideal de radiación o cuerpo negro, elevado a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. (Incropera F. P., 1999)

$$q_{rad} = \sigma AT^4$$

Donde:

σ : Constante de Stefan Boltzmann 5.67×10^{-8} (W/m^2K^4)

Un cuerpo que no cumple con las características de radiación de un cuerpo negro es un cuerpo real, ya que emiten menor cantidad de radiación, y así el flujo de calor por unidad de área que emite una superficie real está dado por:

$$q_{rad} = \sigma A \varepsilon T^4$$

ε : Emisividad que es una propiedad superficial, esta entre cero y uno, sirve para evaluar cuanta energía emite un cuerpo real en relación con un cuerpo negro.

2.1.3.1. Radiación de un cuerpo gris

Para superficies con una temperatura uniforme se tiene que la radiación emitida, reflejada y transmitida desde la superficie produce un intercambio de calor por radiación: (Levenspiel, 1993)

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{air})$$

Donde:

q_{rad} : Calor por radiación (W/m^2K)

h_r : Coeficiente de transferencia de calor por radiación

T_{air} : Temperatura de los alrededores ($^{\circ}C$)

T_s : Temperatura de la superficie ($^{\circ}C$)

A : Área de transferencia de calor por radiación (m^2)

El coeficiente de transferencia de calor por radiación es:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{air})(T_s^4 + T_{air}^4)$$

2.2. El diseño en la ingeniería de sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos

2.2.1. Mecánica de fluidos

La Mecánica de Fluidos se ocupa del estudio de los fluidos en movimiento o en reposo, conocidos como fluido dinámico o fluido estática respectivamente. Esta ciencia trata sobre la acción de fuerzas sobre fluidos, el cual puede ser gas o líquido, el cual se deforma continuamente al someterlo a un esfuerzo tangencial, es decir un esfuerzo cortante, sin importar que tan pequeño sea este.

Para el análisis de cualquier problema de mecánica de fluidos es necesario que el flujo satisfaga las tres leyes de conservación de la mecánica más una relación de estado como lo es

termodinámica y las condiciones iniciales y de contorno apropiadas, a continuación, se enumeran estas leyes, que son independientes de la naturaleza del fluido en cuestión. (White, 2004)

- Ley de conservación de la masa.
- Segunda ley de Newton
- Momento de la cantidad de movimiento
- Primera ley de la termodinámica
- Segunda ley de la termodinámica

2.2.1.1. Ley de conservación de la masa

Antoine Lavoisier demostró que, al efectuarse una reacción química en un cuerpo, la masa de este no se crea ni se destruye, solo se transforma, es decir, las sustancias o componentes reaccionantes al interactuar entre si forman nuevos productos con propiedades físicas y químicas diferentes a las sustancias o componentes iniciales, esto debido a que los átomos de las sustancias se ordenan de forma distinta.

En un sistema de materia fija e identificada, siempre está compuesto por la misma cantidad de materia. La conservación de la masa establece simplemente que la masa es constante en el sistema, por lo que podemos afirmar que: (Nieves, 2018)

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_{SISTEMA} = 0$$

Donde:

$\frac{dM}{dt}$: Derivada de la masa con respecto al tiempo

2.2.1.2. Segunda ley de movimiento de Newton

Para comprender la segunda ley de movimiento de Newton es necesario definir previamente cantidad de movimiento o momento lineal de un objeto, el cual se define mediante la expresión $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$. Es decir, es una magnitud vectorial proporcional a la masa y a la velocidad del objeto. Partiendo de esta definición y aplicando la ley fundamental de la mecánica de Newton, esta ley establece que para que un sistema que se mueve respecto a uno de referencia, la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre él es igual a la rapidez de cambio respecto al tiempo de la cantidad de movimiento lineal del sistema. (Landay & Lifshitz, 1994)

$$\vec{F} = \left(\frac{d\vec{p}}{dt} \right)_{SISTEMA}$$

Donde:

$\frac{d\vec{p}}{dt}$: Derivada de la cantidad de movimiento lineal con respecto al tiempo

\vec{F} : Fuerza (N)

2.2.1.3. Momento de la cantidad de movimiento

La ecuación del momento de cantidad de movimiento de un sistema establece que: la rapidez con la que cambia el movimiento angular del sistema es igual a la suma de momentos de torsión que actúan sobre él. (Cheréque, 1987)

$$\vec{T} = \left(\frac{d\vec{H}}{dt} \right)_{SISTEMA}$$

Donde:

$\frac{d\vec{H}}{dt}$: Derivada del momento angular con respecto al tiempo

\vec{T} : Torque (Nm)

2.2.1.4. Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica constituye una expresión de la conservación de la energía de un sistema. La cantidad de energía térmica y dinámica que ingresa en un sistema sumado a la cantidad de energía térmica que se genera dentro del mismo, menos la cantidad de energía térmica y dinámica que sale del sistema debe ser igual al incremento en la cantidad de energía almacenada en él. “La energía no se puede crear ni destruir durante un proceso, solo puede cambiar de forma” (White, 2004)

$$\delta Q - \delta W = dE$$

Relacionando la ecuación anterior con el tiempo, se tiene:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{SISTEMA}$$

Donde:

$\frac{dE}{dt}$: Derivada de la energía con respecto al tiempo

\dot{Q} : Calor (kJ)

\dot{W} : Trabajo (kJ)

2.2.1.5. Segunda ley de la termodinámica

Los enunciados de Kelvin – Planck y Clausius son equivalentes en sus consecuencias y cualquiera se puede usar como expresión de la segunda ley de la termodinámica, tomando en cuenta que el enunciado de Kelvin – Planck se relaciona con máquinas térmicas, mientras que el enunciado de Clausius se relaciona con refrigeradores o bombas de calor. (Ordorica, 2006)

El enunciado de Kelvin – Planck nos dice “No hay ninguna transformación termodinámica cuyo único efecto sea extraer calor de un foco y convertirlo totalmente en trabajo”

El enunciado de Clausius nos dice “No hay ninguna transformación termodinámica cuyo único efecto sea transferir calor de un foco frío a otro caliente”

2.2.1.6. Clasificación de los fluidos

Los esfuerzos influyen en los fluidos provocando su circulación. Los fluidos newtonianos son los más sencillos de analizar ya que caracterizan por la propiedad de que el gradiente de velocidad en un punto es proporcional al esfuerzo cortante en dicho punto, es decir

$$\tau \propto \frac{du}{dy}$$

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

τ : Esfuerzo cortante (N/m^2)

$\frac{du}{dy}$: Velocidad de cizalladura

η : Viscosidad dinámica del fluido o viscosidad absoluta ($\frac{N*s}{m^2}$)

El esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de cizalladura, en donde la constante de proporcionalidad η es función de la condición del fluido, en particular de su temperatura.

El resto de los fluidos que no sean gobernados por la ecuación anterior se denominan no newtonianos. El aire, el agua, el vapor de agua, todos los gases y la mayoría de los fluidos constituidos por moléculas sencillas son newtonianos. Las suspensiones densas, lodos, emulsiones, soluciones de polímeros de cadena larga, fluidos biológicos, alimentos líquidos, pinturas, suspensiones de arcillas y mezclas de hormigón son, en general no newtonianos. En la Figura 14 podemos observar un fluido en movimiento gracias a un empuje y la formación del gradiente de velocidad. (Levenspiel, 1993)

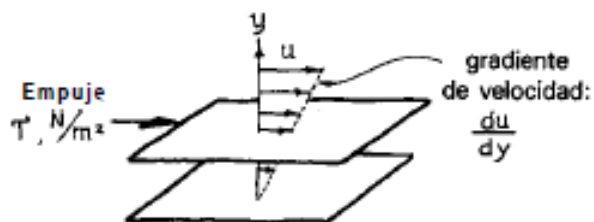


Figura 14 Gráfica representativa del esfuerzo cortante y velocidad de cizalladura en un fluido.

Fuente: (Levenspiel, 1993, pág. 89)

Los fluidos no newtonianos son aquellos donde la viscosidad depende de la temperatura y del gradiente de velocidad, por lo que se los puede clasificar según su dependencia del tiempo, en la Figura 15 podemos observar los tipos de fluidos no newtonianos independientes del tiempo con algunos ejemplos:

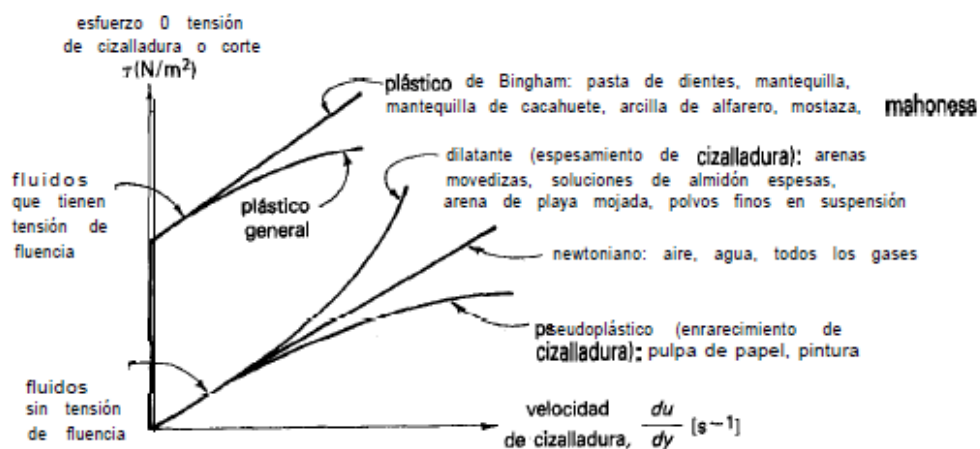


Figura 15 Esfuerzo frente a velocidad de cizalladura para diversos tipos de fluidos no newtonianos independientes del tiempo.

Fuente: (Levenspiel, 1993, pág. 90)

- Pseudoplásticos: Su viscosidad disminuye al aumentar el gradiente.
- Fluidos dilatadores: Su viscosidad aumenta al aumentar su gradiente.
- Plástico de Bingham: En este tipo de fluidos se requiere de un esfuerzo cortante inicial alto para comenzar la deformación del mismo.

En la Figura 16 podemos observar fluidos no newtonianos dependientes del tiempo con algunos ejemplos. (Levenspiel, 1993)

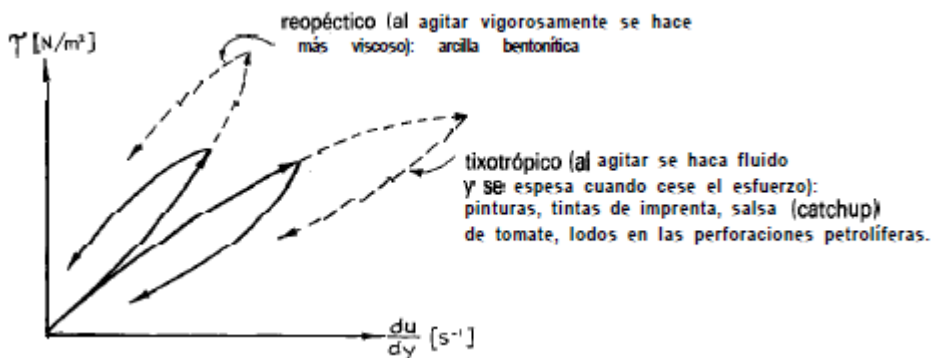


Figura 16 Esfuerzo frente a velocidad de cizalladura para las dos clases de fluidos no newtonianos, dependientes del tiempo, pero no elásticos.

Fuente: (Levenspiel, 1993, pág. 91)

- Reopéctico: Al agitar vigorosamente se hace más viscoso.
- Tixotrópico: al agitar se hace fluido y se espesa cuando cese el esfuerzo.

2.2.1.7. Propiedades de un fluido

2.2.1.7.1. Presión

Los esfuerzos influyen en los fluidos provocando su circulación. Los fluidos newtonianos son los más sencillos de analizar y el esfuerzo de compresión en un punto en un fluido en reposo, la presión es una de las variables más significativas en el análisis de la dinámica de un fluido. Los gradientes de presión generalmente son los responsables de la existencia de flujo, especialmente cuando es en ductos, en flujos de baja velocidad, suele no ser importante la magnitud real de presión, a no ser que baje tanto para provocar burbujas de vapor en líquidos, para evitar tal problema, por conveniencia se asigna una presión de 1 atm.

Para flujos compresibles de gases a altas velocidades si es necesario conocer el valor absoluto de presión. (White, 2004)

2.2.1.7.2. Temperatura

La temperatura se relaciona con la cantidad de energía interna que posee un fluido, la cual puede variar en grandes rangos durante el flujo compresible de un gas. Cuando encontramos diferencias de temperaturas muy altas, la transferencia de calor debe ser considerada, ya que es muy importante. (White, 2004)

2.2.1.7.3. Densidad

La densidad de un fluido es considerada como la masa del fluido por unidad de volumen de este mismo. En los gases la densidad varía mucho, aumentando casi de forma proporcional con la presión, mientras que en los líquidos la densidad es casi constante, por lo que se puede considerar incompresibles a la mayoría de líquidos. (White, 2004)

2.2.1.7.4. Energía interna

La energía interna que posee un fluido se debe al estado de actividad molecular, generalmente se encuentra en función de la temperatura y la presión, aunque para gases ideales esta energía esta únicamente en función de la temperatura. (Larco, 2014)

2.2.1.7.5. Calor específico

Indica la capacidad de un fluido de almacenar energía térmica, ya que por definición el calor específico es la cantidad de calor que debe transferirse a una unidad de masa de sustancia para aumentar su temperatura en un grado, y es representado por el símbolo C , el calor específico en los gases depende del cambio de temperatura y su proceso para lograrlo, si el volumen permanece constante mientras que la temperatura cambia, el calor específico se lo nombrara C_v ; si la presión se mantiene constante durante el cambio de estado, se lo nombrara C_p . (Larco, 2014)

2.2.1.8. Clasificación de los movimientos de un fluido

Las propiedades de los fluidos densidad y viscosidad nos permiten realizar una primera clasificación de estos y del tipo de flujo que se pueden presentar. La Figura 17 nos muestra una de las muchas clasificaciones que se puede tener de los fluidos, pero será utilizada ya que es la más general. (González, 2010)

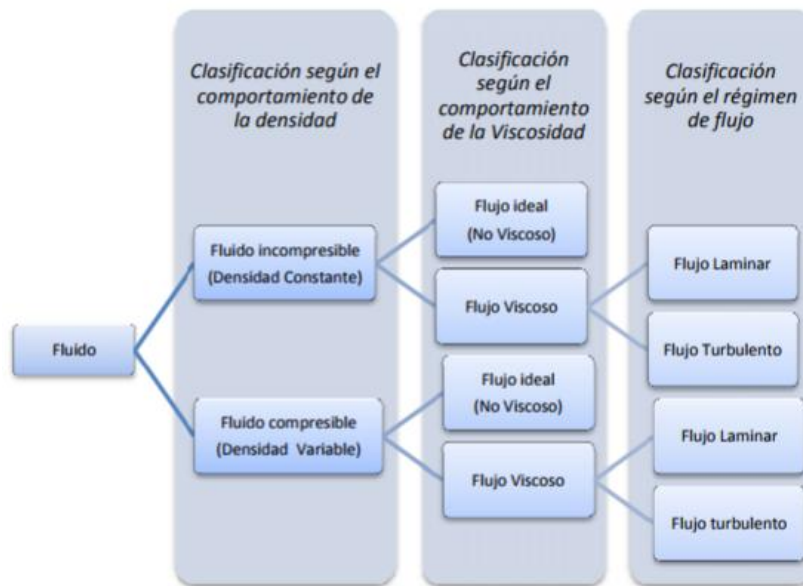


Figura 17 Clasificación del fluido y del flujo según su densidad, viscosidad y régimen de flujo.

Fuente: (González, 2010)

2.2.1.8.1. Fluido incompresible

Un fluido con densidad variable generalmente gases. (González, 2010)

2.2.1.8.2. Fluido compresible

Un fluido con densidad constante o con cambios muy pequeños los cuales pueden ser considerandos despreciables, generalmente son líquidos. (González, 2010)

2.2.1.8.3. Fluido no viscoso o ideal

Se considera que la viscosidad o resistencia a fluir es nula, incluso el flujo puede ser considerado no viscoso o ideal cuando el efecto que genera la viscosidad del fluido es despreciable, en la vida real esto no es cierto, sin embargo, supone una simplificación al momento de resolver problemas de este tipo. (González, 2010)

2.2.1.8.4. Fluido viscoso

En la vida real todos los fluidos presentan viscosidad. Las fuerzas generadas debido a la viscosidad en el flujo de fluidos son de gran importancia, ya que presentan una resistencia a vencer cuando se desee transportar un fluido, además de provocar cambios en la distribución de velocidades dentro del fluido. (González, 2010)

2.2.1.8.5. Flujo laminar

Se da cuando el fluido se mueve en capas adyacentes, entre las cuales no existe intercambio de fluido, como ejemplo, se introduce un filamento de tinta en un flujo laminar, este se moverá aguas abajo sin mezclarse con el resto del fluido, tal como se observa en la Figura 18. (González, 2010)

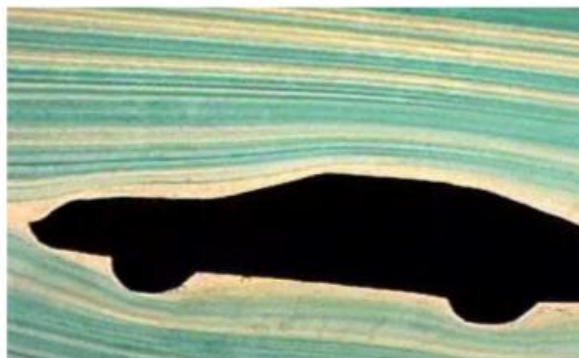


Figura 18 Flujo laminar sobre un perfil de automóvil, se ha introducido o inyectado filamentos de tinta para visualizar la trayectoria del flujo.

Fuente: (González, 2010, pág. 33)

2.2.1.8.6. Flujo turbulento

En un flujo turbulento, el fluido se observa que posee un movimiento aleatorio, existiendo mezcla entre capas de fluido en la corriente de flujo, en el caso del filamento de tinta, tendríamos que se difundiría por todo el flujo. En la Figura 19 se puede observar el movimiento aleatorio de las partículas que puede tener un flujo turbulento. (González, 2010)



Figura 19 Representación de movimiento aleatorio de partículas de un fluido en un flujo turbulento.

Fuente: (González, 2010, pág. 34)

2.2.2. Sistemas eléctricos y electrónicos

2.2.2.1. Generalidades de la electricidad

Las cargas eléctricas pueden desplazarse a través por la diferencia de potencial existente en un medio. Normalmente se mueven a través de conductores, a este movimiento de las cargas se lo conoce como corriente eléctrica, permitiéndonos afirmar que la diferencia de potencial genera corriente eléctrica, es decir las cargas caen del potencial eléctrico más alto al potencial eléctrico más bajo. Los electrones son las únicas partículas capaces de desplazarse a lo largo de los conductores, debido a su pequeño tamaño, y como conocemos estos son de carga negativa, por lo que la corriente eléctrica se mueve desde el polo negativo el cual es la fuente de electrones hacia el positivo, el cual atrae cargas negativas, este tipo de circulación recibe el nombre de corriente electrónica, lo cual la diferencia de la corriente eléctrica la cual fluye al revés, es decir de positivo a negativo. Este acuerdo fue tomado en los principios de la electricidad, para considerar que las cargas se mueven del potencial más alto al más bajo y no como se creía que las

cargas positivas eran las que se desplazaban. Actualmente ambos criterios coexisten, siendo uno real y uno ficticio, pero que al momento de resolver circuitos se puede aplicar ambos obteniendo el mismo resultado. (Peña, 2009)

Dependiendo de la diferencia de potencial existente y del medio conductor, circularan diferentes cantidades de electrones, por lo que es esencial conocer la variación de flujo de cargas, lo que logramos midiendo la intensidad de corriente, la cual se define como la cantidad de cargas que circulan por un conductor en la unidad de tiempo, obteniendo así la siguiente expresión:

$$I = \frac{Q}{t}$$

Donde:

I : Intensidad de corriente (A)

Q : Cantidad de carga (C)

t : Tiempo (s)

La intensidad de corriente eléctrica se expresa en amperios, la cual por definición es el número de culombios por segundo.

2.2.2.2. Componentes básicos que forman un circuito

Los componentes o elementos básicos que conforman un circuito eléctrico se pueden dividir en pasivos y activos, siendo la diferencia entre ellos la capacidad de entregar o absorber energía, denominando activos a los que suministran energía y pasivos a los que absorben energía.

Estos elementos eléctricos son conectados eléctricamente entre sí con el fin de generar, transportar o modificar señales electrónicas o eléctricas. (Peña, 2009)

2.2.2.2.1. Resistores o resistencias

Los resistores o resistencias son componentes pasivos los cuales se oponen al paso de corriente eléctrica. La unidad con la que se mide la resistencia de un material es el Ohmio y se representa con la letra griega omega (Ω).

La interacción que tiene una resistencia en los circuitos eléctricos se define como la diferencia de potencial en los terminales de un componente resistivo, es directamente proporcional a la intensidad de corriente que atraviesa este elemento, generando la siguiente relación: (Peña, 2009)

$$V = R \times I$$

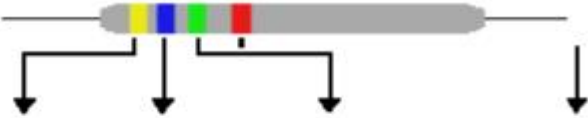
Donde:

V : Diferencia de potencial (V)

R : Resistencia (Ω)

I : Intensidad de corriente (A)

En la *Figura 20* se observa el código de colores para identificar resistencias.



Color	1ra	2da.	Multiplicador	Tolerancia
Plata	-		$10^{-2} = 0.01$	+/- 10 %
Oro	-		$10^{-1} = 0.1$	+/- 5 %
Negro	0	0	$10^0 = 1$	-
Marrón	1	1	$10^1 = 10$	+/- 1 %
Rojo	2	2	$10^2 = 100$	+/- 2 %
Naranja	3	3	$10^3 = 1000$	-
Amarillo	4	4	$10^4 = 10000$	-
Verde	5	5	$10^5 = 100000$	+/- 0'5 %
Azul	6	6	$10^6 = 1000000$	+/- 0'25 %
Violeta	7	7	-	+/- 0'1 %
Gris	8	8	-	+/- 0'05 %
Blanco	9	9	-	-

Figura 20 Código de colores para la identificación de resistencias de 4 bandas.

Fuente: (Peña, 2009, pág. 13)

2.2.2.2.2. Capacitores o condensadores

Un condensador esta contiene dos placas metálicas separadas entre sí por un material aislante, el cual es conocido como dieléctrico.

La interacción que tiene un condensador en los circuitos eléctricos está dada por la diferencia de potencial en los terminales del condensador es proporcional a las cargas que se almacena en este, teniendo una constante de proporcionalidad llamada capacidad del condensador, la cual se representa de la siguiente manera. (Peña, 2009)

$$q(t) = Cx V(t)$$

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$V(t) = \frac{1}{C} x \int i dt$$

Donde:

q : Carga almacenada en el condensador

C : Capacidad del condensador (F)

La unidad de capacidad de un capacitor se llama Faradio, el cual se define como la capacidad de almacenar un culombio de carga al aplicar un voltio, es decir:

$$1 F = \frac{1 C}{1 V}$$

Esta unidad es demasiado grande por lo que se utiliza submúltiplos.

En la Figura 21 se observa un condensador elemental.

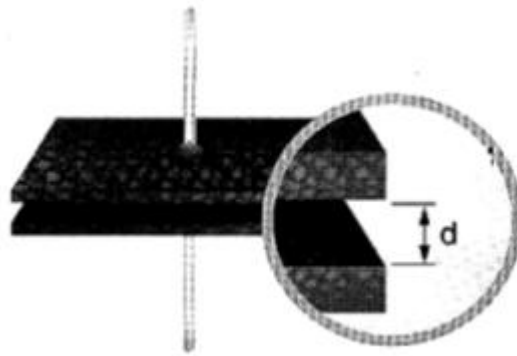


Figura 21 Condensador elemental.

Fuente: (Peña, 2009, pág. 16)

2.2.2.2.3. Inductor o bobina

Los inductores o bobinas están formados por algunas vueltas o espirales de alambre de cobre enrollado entre sí, un transformador es un conjunto de bobinas sobre un mismo núcleo.

Las bobinas almacenan energía eléctrica formando un campo magnético el cual depende de la intensidad de corriente que corra sobre estas, y la devuelve cuando la corriente disminuye.

Una bobina genera una caída de tensión dentro de un circuito eléctrico, el cual se representa de la siguiente manera.

$$V(t) = L \times \frac{di}{dt}$$

Donde:

L : Coeficiente de autoinducción de la bobina (H)

En la Figura 22 podemos observar un conjunto de bobinas con centro toroide.



Figura 22 Bobinas con núcleo toroide.

Fuente: (Peña, 2009, pág. 23)

2.2.2.2.4. Fuente eléctrica

La fuente es un elemento activo ya que es capaz de generar una diferencia de potencial entre sus terminales o proporciona corriente eléctrica, como lo son pilas, baterías, dínamos entre otros.

Existen dos tipos de fuentes para corriente alterna y para corriente continua, ambas poseen dos polos, el negativo y el positivo.

En la Figura 23 se observan diferentes tamaños de pilas.



Figura 23 Tamaño de pilas encontradas en el mercado.

Fuente: (WURTH, 2018)

2.2.2.2.5. Interruptores

Son dispositivos que permiten conducir o interrumpir un circuito cuando sea necesario, son elementos de control, entre los cuales tenemos pulsadores, interruptores, conmutadores, los pulsadores son aquellos que permiten abrir o cerrar un circuito solo si lo mantenemos pulsado, mientras que un interruptor permite abrir o cerrar un circuito mientras este permanece en la misma posición hasta que se vuelva a actuar sobre él, y por último un conmutador permite abrir o cerrar un circuito desde distintos puntos del circuito, comúnmente utilizado para invertir el giro de motores.

En la Figura 24 se puede observar un conjunto de distintos tipos de interruptores.



Figura 24 Interruptores electrónicos.

Fuente: (ABC Proyectos Electrónicos, 2018)

2.2.2.3. Leyes y teoremas eléctricos

Las principales leyes eléctricas permiten el debido análisis y aplicación de los elementos eléctricos y electrónicos, permitiendo realizar circuitos optimizados y funcionales, utilizados en

diferentes aplicaciones, dependiendo de la necesidad u problema identificado, facilitando la vida diaria de los usuarios de productos eléctricos y electrónicos.

2.2.2.3.1. Ley de Ohm

La ley de Ohm nos indica que la relación existente entre la intensidad de corriente que circula a través de conductor, circuito o resistencia, es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica, y directamente proporcional a la tensión. (Sanvalero, 2018)

La ecuación matemática que describe la relación antes mencionada es:

$$I = \frac{V}{R}$$

Donde:

I : Corriente eléctrica (A)

V : Diferencia de potencial (V)

R : Resistencia eléctrica (Ω)

2.2.2.3.2. Ley de Coulomb

La ley de Coulomb nos indica que la intensidad de la fuerza electrostática existente entre dos cargas eléctricas es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

En 1785 Charles Austin Coulomb diseño y desarrollo un dispositivo llamado barra de torsión, el cual estaba constituido por fibras, las cuales permitían un fácil desplazamiento, colocando sobre esta esfera con diferentes cargas eléctricas, permitiéndole así realizar mediciones las cuales lo llevaron a determinar la ecuación de la ley de Coulomb: (Sanvalero, 2018)

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} x q_1 x q_2 x \frac{(\vec{d}_2 - \vec{d}_1)}{|\vec{d}_2 - \vec{d}_1|^3}$$

Donde:

F : Vector fuerza que sufren las cargas eléctricas de atracción o repulsión

ϵ : Permitividad

q : Cargas sometidas al experimento

d : Distancia entre cargas

2.2.2.3.3. Leyes de Kirchhoff

Las leyes de Kirchhoff nos indican la conservación de energía que puede tener un circuito, es decir la distribución y conservación de corriente y voltaje dentro de un circuito eléctrico, a estas leyes se las conoce como ley de nodos o de corrientes y ley de mallas o de voltajes. (Sanvalero, 2018)

- La ley de nodos o de Corrientes nos dice que en todo nodo en donde la intensidad de la carga no varié en un instante de tiempo, la suma de corrientes entrantes es igual a la suma de corrientes salientes, como se puede observar en la Figura 25, es decir la suma de corrientes que entran a un nodo es igual a la suma de corrientes que salen del nodo.

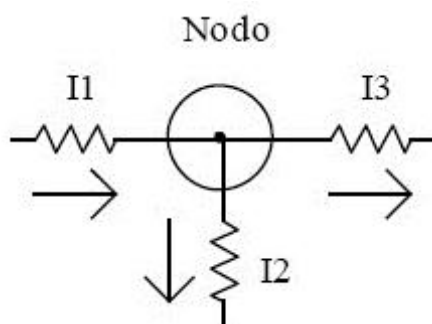


Figura 25 Ley de nodos o de corrientes.

Fuente: (Sanvalero, 2018, pág. 10)

- La ley de mallas o de voltaje nos dice que en toda malla la suma de la caída de tensión en cada elemento es igual a la suma de todas las subidas de tensión como

se observa en la Figura 26, es decir la suma de voltajes en cada elemento que conforma la malla es igual al voltaje aplicado a ese circuito.

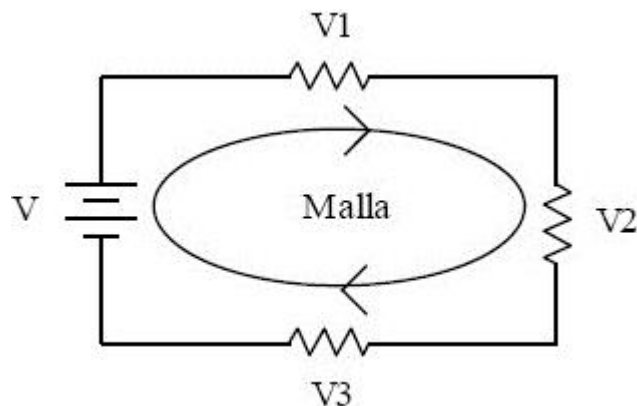


Figura 26 Ley de mallas o de voltaje.

Fuente: (Sanvalero, 2018, pág. 10)

2.2.2.3.4. Ley de Watt

La ley de Watt trata sobre la potencia eléctrica, la cual nos indica que la potencia eléctrica suministrada por un receptor es directamente proporcional a la tensión de alimentación y a la intensidad de corriente que circule por el:

$$P = V \times I$$

Donde:

P : Potencia (W)

V : Tensión eléctrica o voltaje (V)

I : Intensidad eléctrica (A)

La unidad de potencia en el SI es el vatio, el cual equivale a un julio por segundo.

(Sanvalero, 2018)

2.2.2.3.5. Ley de Joule

La ley de Joule nos indica que cuando la corriente eléctrica circula por un conductor, encuentra una dificultad de circulación la cual depende de cada material, a esta dificultad la llamamos resistencia eléctrica, ya que esto produce pérdidas de tensión y potencia, dando lugar al calentamiento de dicho conductor, a este efecto se lo conoce como el efecto Joule, el cual provoca una pérdida de energía eléctrica, transformándola en calor, estas pérdidas se calculan mediante la siguiente expresión: (Sanvalero, 2018)

$$P_p = R \times I^2$$

Donde:

P_p : Potencia perdida (W)

R : Resistencia del conductor (Ω)

I : Intensidad eléctrica (A)

El efecto Joule es aprovechado en dispositivos y aparatos de calentamiento, donde las pérdidas se transforman en energía calorífica, la cual es aprovechada de diferentes maneras.

2.3. Acondicionamiento de sensores y actuadores

Existen muchas aplicaciones en las cuales interfieren medidas ambientales o estructurales mediante sensores, como en el caso de la temperatura o el flujo. Estos sensores necesitan de un previo acondicionamiento de señales antes de que un dispositivo de adquisición de datos pueda medir con eficacia y precisión la señal. Por tal motivo el acondicionamiento de señales es uno de los requisitos más importantes en un sistema de adquisición de datos, ya que, si no se optimizan las señales del mundo real para el digitalizador utilizado, no se puede confiar en la exactitud de la medida.

La mayoría de las señales obtenidas de sensores, requieren alguna forma de preparación antes de ser digitalizadas, a continuación, se indica los tipos comunes de acondicionamiento de señales: (National Instruments, 2018)

2.3.1. Amplificación

En los amplificadores, el nivel de tensión es aumentado, logrando así una mejor adaptación al rango del convertidor analógico – digital (ADC), ayudando de tal manera que incrementa la resolución de la medida y la sensibilidad. Es importante tomar en cuenta la localización de los acondicionadores de señal externa, ya que mientras más cerca de la fuente de señal o transductor, logrando así un incremento del nivel de tensión antes de que se vea afectado por ruido ambiental. Este tipo de acondicionamiento es utilizado en sensores como termopares y medidores de deformaciones. (National Instruments, 2018)

2.3.2. Atenuación

La atenuación, es lo contrario a la amplificación, es decir disminuye la tensión de señales, esto se utiliza cuando las tensiones a digitalizar están por fuera del rango del ADC, como consecuencia del uso de estos, tenemos que, se disminuye la amplitud de la señal de entrada, de modo que la tensión de la señal atenuada quede en un rango admisible del ADC. Este tipo de acondicionamiento es necesario cuando se miden tensiones de más de 10 V. (National Instruments, 2018)

2.3.3. Filtrado

Los filtros son utilizados para rechazar las señales de ruido dentro de un rango determinado. Comúnmente el filtro paso – bajo es utilizado para bloquear ruido de las medidas eléctricas como las que proceden de los 50/60 Hz de la red eléctrica. Los filtros también son

utilizados para evitar el “aliasing” de señales de alta frecuencia, mediante el uso de un filtro “anti – aliasing” el cual atenúa las señales por encima de la frecuencia de Nyquist. Debido a que las medidas de los acelerómetros y micrófonos se analizan comúnmente en el dominio de la frecuencia, los filtros anti – aliasing son ideales para aplicaciones de sonido y vibración. (National Instruments, 2018)

2.3.4. Aislamiento

Este acondicionamiento se lo utiliza cuando las señales de tensión están muy lejanas del rango del digitalizador y pueden dañar el sistema de medida y al operador, por tal motivo, generalmente se utiliza un aislamiento en conjunto con la atenuación, para de esta manera proteger el sistema y al usuario de tensiones peligrosas o de picos de tensión. (National Instruments, 2018)

2.3.5. Excitación

La excitación, es requerida en muchos transductores como galgas extensiométricas, acelerómetros, termistores y RTD, ya que estos necesitan tensiones externas o corrientes de excitación. (National Instruments, 2018)

2.3.6. Linealización

Cuando los sensores producen señales de tensión que no están linealmente relacionados con las medidas físicas, es necesario aplicar la linealización. Esta consiste en un proceso de interpretación de la señal del sensor, lo cual se puede implementar con acondicionamiento de señal o por medio de software. Un termopar es un gran ejemplo de un sensor que necesita ser linealizado. (National Instruments, 2018)

2.3.7. Compensación de la unión fría

En un termopar, para obtener mediciones precisas es necesaria la compensación de la unión fría. La diferencia de tensión entre dos metales diferentes es como los termopares miden la temperatura, basándonos en este concepto, en la conexión entre el termopar y el terminal de un dispositivo de adquisición de datos se genera otra tensión, para obtener una mejora en la precisión aplicando la corrección apropiada, es necesario la compensación de la unión fría. (National Instruments, 2018)

2.3.8. Terminación del puente

Los puentes completos, son necesarios para que los sensores en montaje puedan formar un puente de Wheatstone de cuatro resistencias. Las resistencias de terminación nos brindan una referencia de tensión para detectar pequeños cambios de tensión mediante el sensor o sensores activos. (National Instruments, 2018)

2.3.9. Método de muestreo

Para enrutar una serie de señales a un solo digitalizador, es común utilizar la multiplexación, ya que logra ampliar en gran medida el número de señales de un sistema de una manera rentable, aunque es recomendable un muestreo simultaneo cuando se tiene un caso de caracterización de una estructura en los cuales puede resultar critica la medida de dos o más señales en el mismo instante. (National Instruments, 2018)

2.4. Controladores, diseño

El controlador es un elemento en un sistema en lazo cerrado que produce una salida de señal la cual se convierte en la entrada al elemento correctivo o planta, teniendo como entrada al controlador una señal de error del sistema a controlar.

Es importante la selección apropiada del controlador para una planta en un sistema en lazo cerrado, además de la determinación de parámetros idóneos para el controlador seleccionado.

La relación que existe entre la entrada y la salida del controlador, comúnmente se la denomina la ley de control, existiendo tres formas de dicha ley, las cuales son: proporcional, integral y derivativa. Aunque en algunos casos es necesario mejorar el desempeño de los controladores, para lo cual se suele introducir en los sistemas de control elementos adicionales denominados compensadores. (Bolton, 2006)

2.4.1. Control proporcional

En el control proporcional, la salida del controlador es directamente proporcional a su entrada, sabemos que la entrada es la señal de error e , la cual está en función del tiempo, de esta manera:

$$\text{Salida} = K_p e$$

Donde:

K_p : Ganancia proporcional

e : Error

Entonces tenemos que la salida del controlador dependerá solo de la magnitud del error en el instante en el que se lo considere, para lo cual, la función de transferencia para este controlador es:

$$G_c(s) = K_p$$

En efecto, el controlador es solo un amplificador con una ganancia constante. En cierto tiempo, un error grande genera una salida grande en el controlador, sin embargo, la ganancia constante, tiende a existir sobre cierto rango de errores, a los cuales se los conoce como banda proporcional. En la Figura 27 observamos la salida contra el error con una pendiente K_p en la banda proporcional (Bolton, 2006)

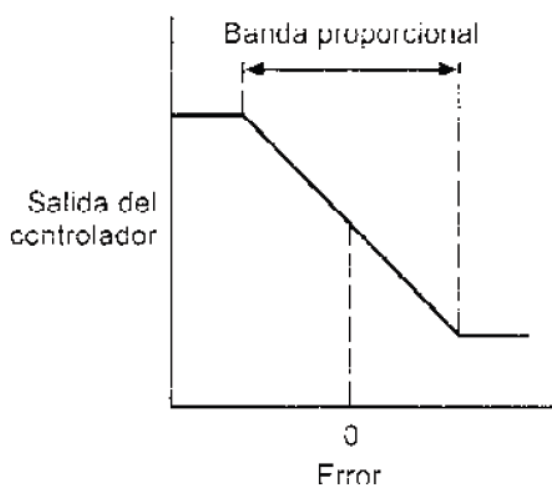


Figura 27 Control proporcional.

Fuente: (Bolton, 2006, pág. 225)

La forma del control proporcional es como se describe en la Figura 28, y el resultado es una función de transferencia en lazo abierto de:

$$G_o(s) = K_p G_p(s)$$

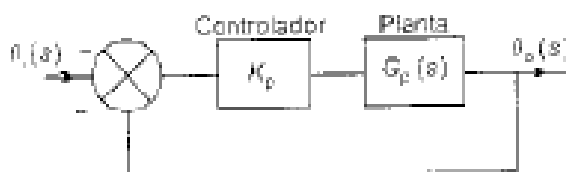


Figura 28 Sistema con control proporcional.

Fuente: (Bolton, 2006, pág. 226)

2.4.2. Control integral

En este control tenemos que la salida del controlador es proporcional a la integral de la señal de error e en el tiempo, es decir tenemos que:

$$Salida = K_i \int_0^t e dt$$

Donde:

K_i : Constante de ganancia integral.

En la Figura 29 se observa la corrección del error a través de un tiempo cuando el error es de forma escalón, de tal manera el error va disminuyendo, por lo que la salida es la acumulación de corrección de errores pasado. (Bolton, 2006)

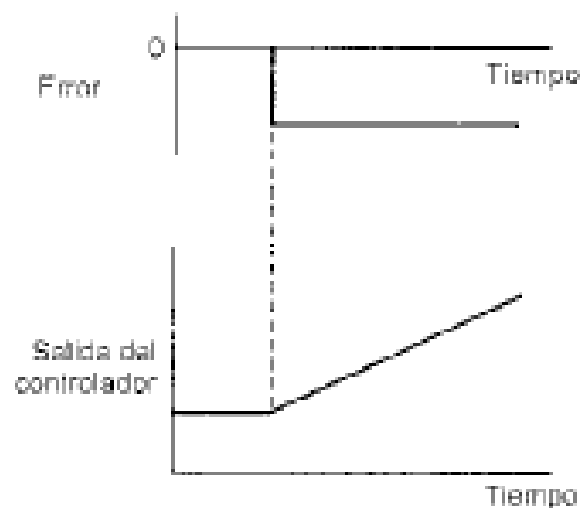


Figura 29 Control integral.

Fuente: (Bolton, 2006, pág. 227)

La función de transferencia de control integral tiene la siguiente forma:

$$G_c(s) = \frac{K_i}{s}$$

La forma de control integral es como se describe en la Figura 30 y el resultado de la función de transferencia en lazo abierto será:

$$G_o(s) = \frac{K_i}{s} G_p(s)$$

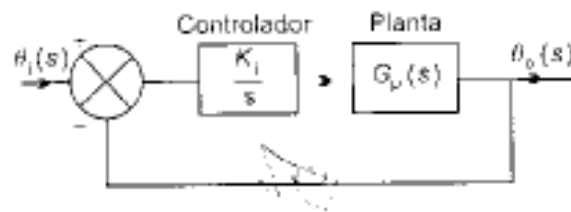


Figura 30 Sistema con control integral.

Fuente: (Bolton, 2006, pág. 228)

2.4.3. Control proporcional integral

La reducción en la estabilidad relativa como resultado de usar un control integral, se puede resolver con una extensión mediante el control proporcional integral, como el que se observa en la Figura 31, en donde la combinación de estos dos controladores nos genera una salida de la forma: (Bolton, 2006)

$$Salida = K_p e + K_i \int_0^t e dt$$

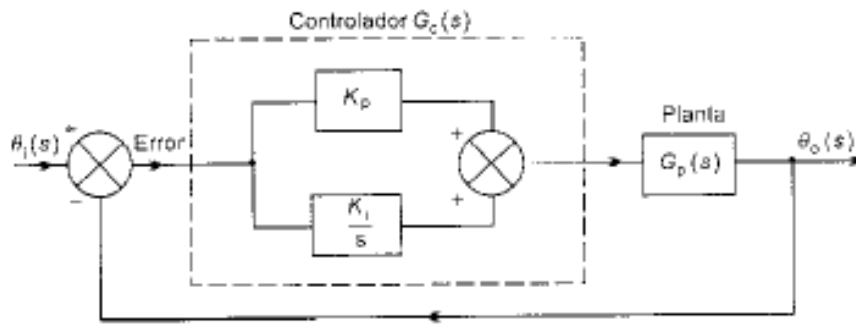


Figura 31 Control proporcional integral.

Fuente: (Bolton, 2006, pág. 230)

En la Figura 32 podemos observar la salida del controlador que representa la salida cuando tenemos una entrada de tipo escalón.

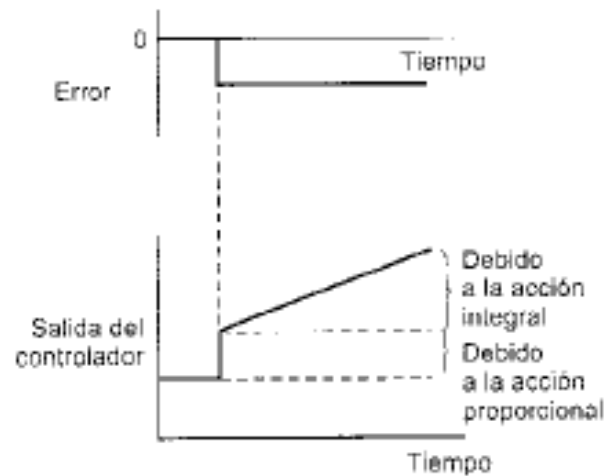


Figura 32 Salida controlador proporcional integral.

Fuente: (Bolton, 2006, pág. 230)

En donde tendremos que la función del controlador viene dada por:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p \left(s + \left(\frac{K_i}{K_p} \right) \right)}{s}$$

Donde $\frac{K_p}{K_i}$ se denomina constante de tiempo integral, τ_i , y de esta manera tendremos:

$$G_c(s) = \frac{K_p \left(s + \left(\frac{1}{\tau_i} \right) \right)}{s}$$

Entonces tendremos que la función de transferencia de trayectoria directa para el sistema es:

$$G_o(s) = \frac{K_p \left(s + \left(\frac{1}{\tau_i} \right) \right) G_p(s)}{s}$$

2.4.4. Control derivativo

Un controlador en la forma derivativa nos indica que la salida del controlador es proporcional a la razón de cambio con el tiempo del error e , es decir

$$\text{Salida} = K_d \frac{de}{dt}$$

Donde:

K_d : Ganancia derivativa

Como se puede observar en la Figura 33, nos indica que el control derivativo actúa cuando inicia el error ante una entrada tipo rampa, corrigiéndolo inmediatamente cuando la magnitud del error es grande, indicándonos que puede corregir de manera inmediata grandes errores, pero esto lo vuelve insensible a señales de error constantes o que varían con lentitud, por tal motivo es un controlador que no se usa solo, sino combinado con otras formas de controladores. (Bolton, 2006)

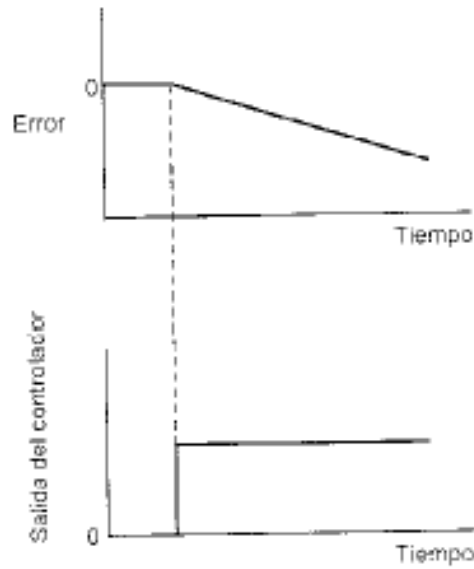


Figura 33 Control derivativo ante una entrada de señal tipo rampa.

Fuente: (Bolton, 2006, pág. 232)

Para el control derivativo, tenemos una función de transferencia de la siguiente forma:

$$G_c(s) = K_d s$$

En donde para un sistema en lazo cerrado como el que se muestra en la Figura 34, la presencia del control derivativo produce una función de transferencia en lazo abierto de la siguiente forma:

$$G_o(s) = \frac{K_d s G_p(s)}{1 + K_d s G_p(s)}$$

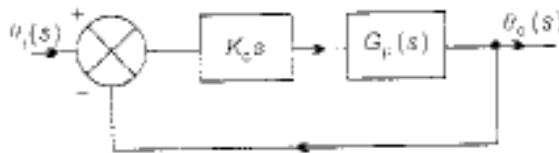


Figura 34 Control derivativo.

Fuente: (Bolton, 2006, pág. 232)

2.4.5. Control proporcional derivativo

Si el control derivativo se usa con el proporcional como se observa en la Figura 35, entonces la función de transferencia en lazo abierto tendrá la siguiente forma: (Bolton, 2006)

$$G_o(s) = (K_p + K_d s)G_p(s) = K_d \left(\left(\frac{1}{\tau_d} \right) + s \right) G_p(s)$$

Donde:

τ_d : se denomina constante de tiempo derivativa $\left(\frac{K_p}{K_d} \right)$

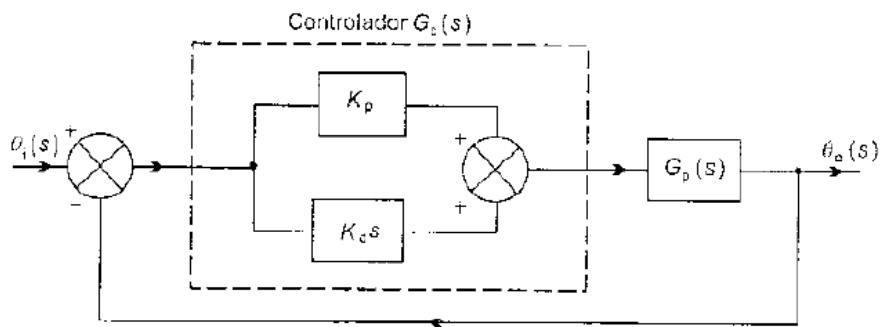


Figura 35 Control proporcional derivativo.

Fuente: (Bolton, 2006, pág. 233)

2.4.6. Control PID

Un controlador PID o proporcional integral derivativo, también es conocido como controlador de tres términos, con una forma de sistema mostrada en la Figura 36, nos da como salida para una entrada de error, la siguiente expresión

$$\text{Salida} = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt}$$

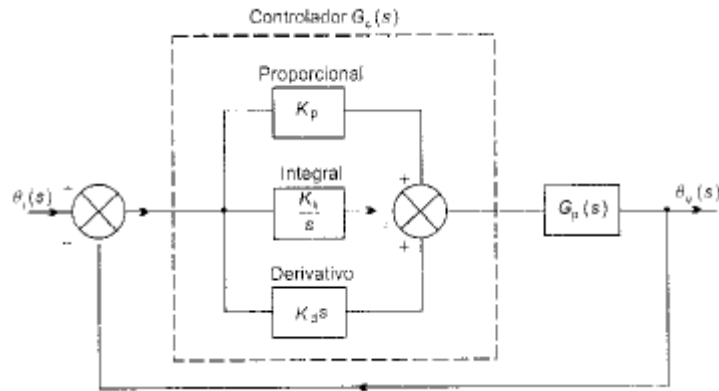


Figura 36 Control PID.

Fuente: (Bolton, 2006, pág. 235)

Debido a la constante de tiempo integral τ_i y la constante de tiempo derivativo τ_d , podemos escribir de la siguiente forma la ecuación anterior:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

Y la función de lazo abierto para el sistema de la Figura 29 sería:

$$G_o(s) = \frac{K_p(\tau_i s + 1 + \tau_i \tau_d s^2)G_p(s)}{\tau_i s}$$

3. CAPÍTULO 3: DISEÑO MECATRÓNICO

3.1. Despliegue de la función de calidad (QFD)

Se realiza una matriz de planificación con el fin de trasladar las necesidades pedidas por el cliente a características de actividades del proceso de diseño, para lo cual se debe seguir el siguiente procedimiento.

- a. Para iniciar el diseño de un producto a desarrollar, es necesario describir las necesidades o requerimientos que se necesita que cumpla dicho producto, para luego ser valoradas en una escala de 1 al 5, siendo 1 el valor de menor importancia y así determinar la importancia de cada una de las necesidades pedidas por los beneficiarios, para lo cual cada necesidad será enlistada en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3

Listado de necesidades del Laboratorio de Energías.

Número	Enunciado de necesidad	Importancia
1	El tiempo de preparación del equipo para realizar las prácticas, es relativamente rápida, comparada con el equipo existente en el laboratorio.	5
2	El equipo posee tres diferentes tipos de turbuladores (Plano, aletas y espigas.)	5
3	El equipo se controla desde un computador.	5
4	El equipo se maneja sencillamente.	3
5	La temperatura se puede controlar y variar en cada práctica.	5
6	El caudal se puede controlar y variar en cada práctica.	5
7	El mantenimiento del equipo es muy sencillo de realizar.	2
8	El equipo es desmontable.	2
9	La construcción del equipo es de bajo costo.	3
10	El equipo es liviano.	1
11	El equipo ocupa un pequeño espacio en el laboratorio.	2

CONTINÚA

12	El equipo posee alarmas de temperatura preventivas.	4
13	El equipo tiene una larga vida útil.	4

- b. El siguiente paso en esta etapa de diseño trata sobre las actividades del proceso que se van a realizar para satisfacer los requerimientos o necesidades planteadas por el cliente como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Actividades a realizar para satisfacer necesidades y requerimientos planteados.

Número	Número de necesidad	Parámetro	Importancia	Unidades
1	1, 2	Tiempo de realizar prácticas.	5	Min
2	2, 3	Fácil de intercambiar y usar.	5	Min
3	5, 12	Temperatura controlada.	5	C
4	6	Caudal controlable.	5	Lt/min
5	7, 8	Cantidad de piezas.	2	#piezas
6	9	Bajo costo de manufactura.	3	\$
7	10	Masa total.	1	Kg
8	11	Dimensión de ancho de la máquina.	2	M
9	11	Dimensión de largo de la máquina.	2	M
10	11	Dimensión de alto de la máquina.	2	M
11	13	Resistencia del material de la máquina.	4	Mpa

- c. Continuando con el análisis QFD, tenemos la etapa de relaciones entre requerimientos y actividades, la cual consiste en identificar qué actividades se van a llevar a cabo para satisfacer los requerimientos del cliente y que tan relacionadas están entre sí, como se muestra en la Tabla 5, en donde 9 es la mejor puntuación y 1 es la menor.

- d. Para continuar con el análisis QFD tenemos que comparar nuestra propuesta con equipos existentes en el mercado, para lo cual utilizaremos el equipo del laboratorio de la Universidad de las Fuerzas armadas ESPE, el equipo propuesto por EDIBON y el equipo propuesto por ARMFIELD, los tres equipos están detallados en el Capítulo 1. A continuación se muestra en la Tabla 6 la comparación sobre las necesidades mostradas por los clientes tomando una valoración de 5 siendo la más alta y 1 siendo la más baja, además esta matriz posee el objetivo que desea alcanzar nuestro equipo propuesto.

Tabla 6

Comparación entre equipo propuesto y equipos existentes en el mercado.

	EQUIPOS			
	Equipo propuesto OBJETIVO	Equipo de laboratorio EDIBON IT 03.2	EDIBON IT 03.2	ARMFIELD HT10XC
Que el tiempo de preparación del equipo para realizar las prácticas sea rápido	5	2	4	4
Que el equipo posea tres diferentes tipos de turbuladores	5	1	5	5
Que el equipo se controle desde un computador	5	1	5	4
Que el equipo sea fácil de manejar	5	5	5	5
Que la temperatura del equipo se pueda controlar y variar en cada practica	5	3	4	4
Que el caudal del equipo se pueda controlar y variar en cada practica	5	5	4	4
Que el mantenimiento del equipo sea sencillo de realizar	5	1	3	3
Que el equipo sea desmontable	5	1	1	1

NECESIDADES

CONTINÚA

Que la construcción del equipo sea de bajo costo	5	3	1	1
Que el equipo sea liviano	4	1	4	4
Que el equipo ocupe un espacio pequeño	4	1	4	4
Que el equipo posea alarmas de temperatura preventivas.	5	1	5	5

- e. El siguiente paso del análisis QFD tiene que ver con el radio de mejora que proponemos el cual se obtiene de dividir la calificación el equipo que posee la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE con la calificación del objetivo o equipo propuesto, además podemos intervenir como fabricantes y diseñadores utilizando la columna de argumento de venta, en el cual se ubica calificaciones de 1 a 1.5 siendo 1 un mal argumento de venta y 1.5 un buen argumento de venta para luego calcular las ponderaciones absolutas, las cuales se obtienen de la multiplicación entre la importancia, el radio de mejora y el argumento de venta, además debemos obtener ponderaciones relativas para cada necesidad, las cuales se obtienen al multiplicar por 100 cada ponderación absoluta y dividiéndola para la sumatoria de ponderaciones absolutas, y por ultimo colocando así el orden de importancia de cada necesidad, lo cual se indica en la siguiente
- f.
- g. Tabla 7.

Tabla 7*Radio de mejora a proponer, e importancia de cada necesidad.*

	IMPORTANCIA	Radio de Mejora	Argumento de venta	Ponderación Absoluta	Ponderación Relativa (%)	Orden de importancia
NECESIDADES						
Que el tiempo de preparación del equipo para realizar las prácticas sea rápido	5	2.5	1.5	18.75	9.8	4
Que el equipo posea tres diferentes tipos de turbuladores	5	5	1.5	37.5	19.6	1
Que el equipo se controle desde un computador	5	5	1.5	37.5	19.6	2
Que el equipo sea fácil de manejar	3	1	1	3	1.57	12
Que la temperatura del equipo se pueda controlar y variar en cada practica	5	1.7	1.5	12.5	6.54	6
Que el caudal del equipo se pueda controlar y variar en cada practica	5	1	1.5	7.5	3.92	10
Que el mantenimiento del equipo sea sencillo de realizar	2	5	1	10	5.23	7
Que el equipo sea desmontable	2	5	1.5	15	7.84	5
Que la construcción del equipo sea de bajo costo	3	1.7	1.5	7.5	3.92	9
Que el equipo sea liviano	1	4	1	4	2.09	11
Que el equipo ocupe un espacio pequeño	2	4	1	8	4.18	8
Que el equipo posea alarmas de temperatura preventivas.	4	5	1.5	30	15.7	3
				191.3	100	

- h. Lo siguiente que se debe realizar en el análisis QFD, es encontrar el orden de importancia de cada parámetro a tomar en cuenta durante el diseño, para lo cual se

realiza la sumatoria de la columna de cada parámetro multiplicada por la ponderación relativa de cada necesidad, obteniendo así la siguiente Tabla 8.

Tabla 8

Orden de importancia de parámetros a tomar en cuenta durante el diseño.

PARÁMETROS												
	Tiempo de realizar prácticas	Fácil uso	Varios turbuladores	Control de temperatura	Control de caudal	Cantidad de piezas	Costo de manufactura	Masa total	Ancho del equipo	Largo del equipo	Alto del equipo	Resistencia del material del equipo
Ponderación absoluta	474	673	487	493	298	415	131	203	172	172	211	213
Ponderación relativa	12	17	12	13	7.5	11	3.3	5.1	4.4	4.4	5.4	5.4
Orden de importancia	3	1	4	2	6	5	12	9	10	11	7	8
Orden de importancia	3	1	4	2	6	5	12	9	10	11	7	8

Como se observa en la Tabla 8 los parámetros de mayor importancia y sobre los cuales se considerará el diseño son: Fácil uso, control de temperatura, tiempo que toma en realizar prácticas, varios turbuladores y cantidad de piezas a realizar. El resto de parámetros serán considerados de una manera superficial y de ser posibles serán integrados a los parámetros considerados más importantes.

3.2. Diseño del equipo

Una vez que se idealiza la alternativa de solución, se procede a analizar cada uno de los parámetros que se deben tomar en cuenta en el diseño de esta alternativa, buscando la mejor solución, que abarque gran cantidad de necesidades planteadas por el usuario.

3.2.1. Selección de material de estructura de soporte

Para determinar el porcentaje de importancia de cada función o parámetro a ser tomado en cuenta en esta pieza, se realizará una tabla comparativa entre estos parámetros como se observa en la Tabla 9.

Donde:

0: No importante en comparación a otro.

2.5: Ambos parámetros son igual de importantes.

5: El parámetro es más importante que el otro.

Tabla 9

Tabla comparativa selección de material de estructura de soporte.

Parámetro	Costo de manufactura	Masa total	Cantidad de piezas	Resistencia del material	$\sum +1$	Porcentaje
Costo de manufactura		2.5	5	2.5	11	35%
Masa total	0		5	2.5	8.5	27%
Cantidad de piezas	0	0		2.5	3.5	11%
Resistencia del material	0	2.5	5		8.5	27%
				Total	31.5	100%

En la siguiente Tabla 10 se muestra la matriz de comparación para la selección del material de la estructura de soporte, calificando de la siguiente manera.

1: Bueno

3: Muy bueno

5: Excelente

Tabla 10

Matriz de calificación de material para estructura soporte.

Parámetro de selección	Porcentaje de importancia	Acero A36		Aluminio	
		Valor	Total	Valor	Total
Costo de manufactura	35%	5	1.75	1	0.35
Masa total	27%	3	0.81	5	1.35
Cantidad de piezas	11%	5	0.55	5	0.55
Resistencia de material	27%	5	1.35	1	0.27
		Total	3.11	Total	2.52

Como se observa en la Tabla 10, nos indica que para el diseño de la estructura de soporte la mejor opción es el Acero A36, facilitando así los cálculos estructurales siguientes.

3.2.2. Selección de material de ducto, tolva y caja térmica

Para determinar el porcentaje de importancia de cada función o parámetro a ser tomado en cuenta en estas piezas, se realizó una tabla comparativa entre estos parámetros mostrados anteriormente en la Tabla 8.

En la siguiente Tabla 11 se muestra la matriz de comparación para la selección del material del ducto, tolva y caja térmica, calificando de la siguiente manera.

1: Bueno

3: Muy bueno

5: Excelente

Tabla 11*Matriz de calificación de material de ducto, tolva y caja termica.*

Parámetro de selección	Porcentaje de importancia	Acero Inoxidable		Aluminio	
		Valor	Total	Valor	Total
Costo de manufactura	35%	3	1.05	1	0.35
Masa total	27%	3	0.81	5	1.35
Cantidad de piezas	11%	5	0.55	5	0.55
Resistencia de material	27%	5	1.35	1	0.27
		Total	3.76	Total	2.52

Como se observa en la Tabla 11, nos indica que, para el diseño del ducto y la tolva, la mejor opción es el Acero Inoxidable, permitiéndonos así realizar el diseño para dicho material.

3.2.3. Selección de material de turbuladores

Para determinar el porcentaje de importancia de cada función o parámetro a ser tomado en cuenta en la construcción de los turbuladores, se realizará una tabla comparativa entre estos parámetros como se observa en la Tabla 12.

Donde:

0: No importante en comparación a otro.

2.5: Ambos parámetros son igual de importantes.

5: El parámetro es más importante que el otro.

Tabla 12*Tabla comparativa selección de material de turbuladores.*

Parámetro	Tiempo de realizar prácticas	Varios turbuladores	Cantidad de piezas	Masa total	Costo de manufactura	$\sum +1$	Porcentaje
Tiempo de realizar practicas		2.5	5	5	2.5	16	32%
Varios turbuladores	0		2.5	5	5	13.5	27%
Cantidad de piezas	0	2.5		2.5	0	6	12%
Masa total	0	0	0		2.5	3.5	7%
Costo de manufactura	2.5	2.5	2.5	2.5		11	22%
					Total	50	100%

En la siguiente Tabla 13 se muestra la matriz de comparación para la selección del material de los turbuladores, calificando de la siguiente manera.

1: Bueno

3: Muy bueno

5: Excelente

Tabla 13*Matriz de calificación de material para turbuladores.*

Parámetro de selección	Porcentaje de importancia	Acero A36		Acero inoxidable		Aluminio	
		Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Tiempo de realizar prácticas	32%	3	0.96	3	0.96	5	1.6
Varios turbuladores	27%	3	0.81	3	0.81	3	0.81
Cantidad de piezas	12%	3	0.36	3	0.36	3	0.36
Masa total	7%	3	0.21	3	0.21	5	0.35
Costo de manufactura	22%	5	1.1	3	0.66	3	0.66
		Total	3.44	Total	3	Total	3.78

Como se observa en la Tabla 13, nos indica que, para el diseño de los turbuladores de calor, la mejor opción es el Aluminio, facilitando así los cálculos correspondientes.

3.2.4. Selección del tipo de ventilador

Para la selección del ventilador a utilizar en el proyecto, determinamos el porcentaje de importancia de cada función o parámetro que influye de mayor manera en este elemento, así como se muestra en la siguiente Tabla 14.

Donde:

0: No importante en comparación a otro.

2.5: Ambos parámetros son igual de importantes.

5: El parámetro es más importante que el otro.

Tabla 14

Tabla comparativa selección de tipo de ventilador.

Parámetro	Fácil uso	Cantidad de piezas	Control de caudal	Resistencia del material	$\sum +1$	Porcentaje
Fácil uso		5	2.5	2.5	11	30%
Cantidad de piezas	2.5		0	2.5	6	16%
Control de caudal	2.5	5		2.5	11	30%
Resistencia del material	2.5	2.5	2.5		8.5	24%
				Total	36.5	100%

En la siguiente Tabla 15 se muestra la matriz de comparación para la selección del tipo de ventilador que se usara en el proyecto, calificando de la siguiente manera.

1: Bueno

3: Muy bueno

5: Excelente

Tabla 15

Matriz de calificación de tipo de ventilador.

Parámetro de selección	Porcentaje de importancia	Ventilador AC		Ventilador DC	
		Valor	Total	Valor	Total
Fácil uso	30%	5	1.5	5	1.5
Cantidad de piezas	16%	5	0.8	5	0.8
Control de caudal	30%	5	1.5	5	1.5
Resistencia de material	24%	5	1.2	3	0.72
		Total	5	Total	4.52

Como se observa en la Tabla 15, nos indica que, el tipo de ventilador más óptimo para nuestro proyecto es un ventilador AC.

3.2.5. Selección de forma de niquelina

Para la selección de la forma de la niquelina a utilizar en el proyecto, determinamos el porcentaje de importancia de cada función o parámetro que influye de mayor manera en este elemento, así como se muestra en la siguiente Tabla 16.

Donde:

0: No importante en comparación a otro.

2.5: Ambos parámetros son igual de importantes.

5: El parámetro es más importante que el otro.

Tabla 16*Tabla comparativa selección de forma de niquelina.*

Parámetro	Tiempo de realizar prácticas	Cantidad de piezas	Control de temperatura	Costo de manufactura	$\sum +1$	Porcentaje
Tiempo de realizar prácticas	5	2.5	5	13.5	40%	
Cantidad de piezas	0	0	2.5	3.5	10%	
Control de temperatura	2.5	5	5	13.5	40%	
Costo de manufactura	0	2.5	0	3.5	10%	
			Total	34	100%	

En la siguiente Tabla 17 se muestra la matriz de comparación para la selección del tipo de ventilador que se usara en el proyecto, calificando de la siguiente manera.

1: Bueno

3: Muy bueno

5: Excelente

Tabla 17*Matriz de calificación de forma de niquelina.*

Parámetro de selección	Porcentaje de importancia	Niquelina curva		Niquelina recta	
		Valor	Total	Valor	Total
Tiempo de realizar prácticas	40%	5	2	3	1.2
Cantidad de piezas	10%	5	0.5	3	0.3
Control de temperatura	40%	5	2	5	2
Costo de manufactura	10%	3	0.3	5	0.5
		Total	4.8	Total	4

Como se observa en la Tabla 17, nos indica que, la niquelina con forma curva es la más óptima para nuestro proyecto.

3.3. Diseño mecánico

3.3.1. Diseño de la estructura de soporte

Al ser un sistema estático, es necesario tomar en cuenta los pesos que actuaran sobre la estructura, para así determinar los parámetros necesarios de esta, dichos pesos se presentan en resumen en la Tabla 18.

Tabla 18

Pesos que actúan sobre la estructura soporte.

Elemento	Peso unitario [N]	Cantidad	Peso Total [N]
Ducto	38.024	1	38.024
Tolva	5.88	1	5.88
Motor	28.91	1	28.91
Sensor	0.98	8	7.84
Caja de circuitos	48.02	1	48.02
Tornillos	0.6	16	9.6
Caja térmica	10.78	1	10.78
Placa de turbulador	9.8	1	9.8
Pantalla computador	29.4	1	29.4
Mouse y teclado	14.7	1	14.7
CPU	49	1	49
Operario	686	1	686
TOTAL			937.954

Tomando en cuenta que todos estos pesos serán soportados por la estructura, con la ayuda de una simulación CAE se determinó cual sería el elemento más crítico y sobre el cual deberíamos diseñar, como se observa en la Figura 37.

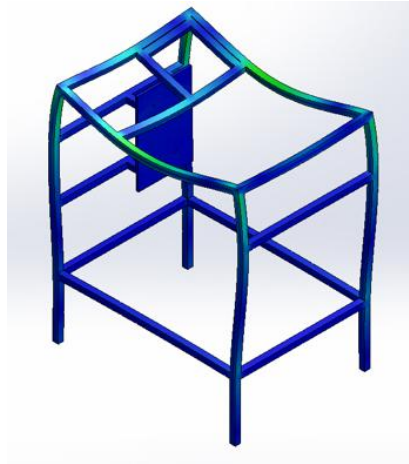


Figura 37 Simulación CAE de estructura soporte.

Como se observa, la mayor deformación del soporte se da en la viga superior que tendrá 650 mm de longitud. La estructura será soldada, por lo que se obtiene mayor rigidez y soporte, por lo que para su análisis tenemos una viga hiperestática, con doble empotramiento con una carga distribuida de peso sobre ella como se observa en la Figura 38. El peso que soporta la viga se distribuyen de manera uniforme a lo largo de esta para lo que se indica en la ecuación.

$$W_{total} = W_{ducto} + W_{tolva} + W_{sensor} + W_{tornillos} + W_{intercambiador} + W_{placa} + W_{pantalla} \\ + W_{tecladomouse} + W_{operario}$$

$$W_{total} = 38.024 + 5.88 + 7.84 + 9.6 + 10.78 + 9.8 + 29.4 + 14.7 + 686$$

$$W_{total} = 812.024 [N]$$

La carga distribuida sobre la viga será:

$$q_{total} = \frac{812.024 [N]}{0.65 [m]} = 1249.27 \frac{[N]}{[m]}$$

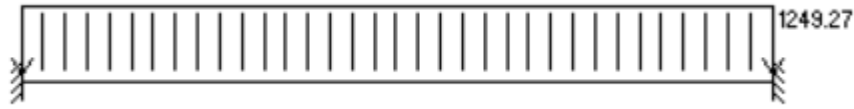


Figura 38 Diagrama de viga empotrada en ambos extremos.

Para calcular los momentos que se generan en cada empotramiento tenemos:

$$M = \frac{1}{12}qL^2$$

$$M_1 = M_2 = \frac{1}{12}(1249.27)(0.65)^2 = 43.98 [N * m]$$

Una vez obtenido el momento flector, es necesario hallar las reacciones en el punto A y en el punto B, las cuales las podemos encontrar con sumatoria de fuerzas en “Y”:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A + R_B - P = 0$$

$$R_A + R_B = 1249.27 * 0.65 = 812.024 [N]$$

Realizamos suma de momentos en el punto A:

$$\sum M_A = 0$$

$$-M_1 + M_2 + R_B * L - P * \frac{L}{2} = 0$$

$$R_B = \frac{1249.27 * 0.65 * \frac{0.65}{2}}{0.65} = 406.01 [N]$$

$$R_A = 406.01 [N]$$

Para realizar el diagrama de cortante, analizamos 3 puntos, el centro y en los extremos de la viga obtenemos que:

$$\sum F_y = 0$$

$$-V + R_A - W_x = 0$$

$$V = -W_x + R_A = -1249.27(x) + 406.01$$

$$V = -1249.27(0) + 406.01 = 406.01 [N]$$

$$V = -1249.27(0.325) + 406.01 = 0 [N]$$

$$V = -1249.27(0.65) + 406.01 = -406.01 [N]$$

Obteniendo así la forma gráfica del cortante, mostrado en la Figura 39.

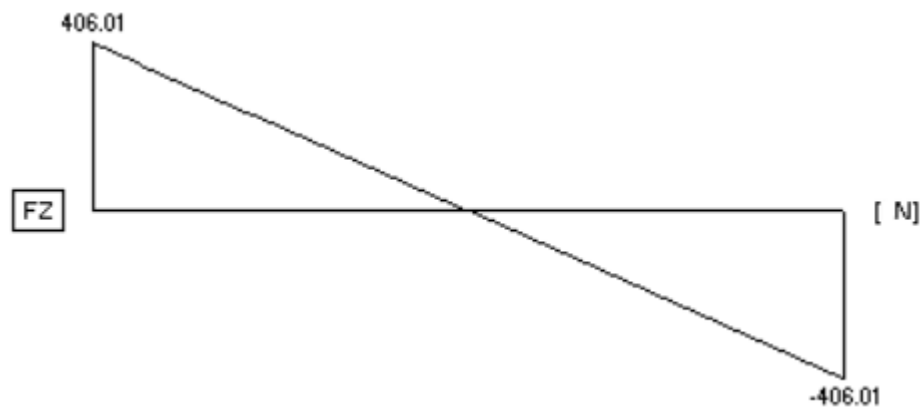


Figura 39 Gráfica de cortante en estructura de soporte.

Luego se calcula los momentos críticos que va a tener la viga:

$$A_1 = \frac{1}{2} * R_A * \frac{L}{2} = \frac{1}{2} * 406.01 * \frac{0.65}{2} = 65.98 [N * m]$$

$$M(0) = M_1 = 43.98 [N * m]$$

$$M(0.325) = 43.98 - 65.98 = -21.99 [N * m]$$

$$M(0.65) = -21.99 + 65.98 = 43.98 [N * m]$$

Con lo cual obtenemos el diagrama de momento flector que se indica en la Figura 40.

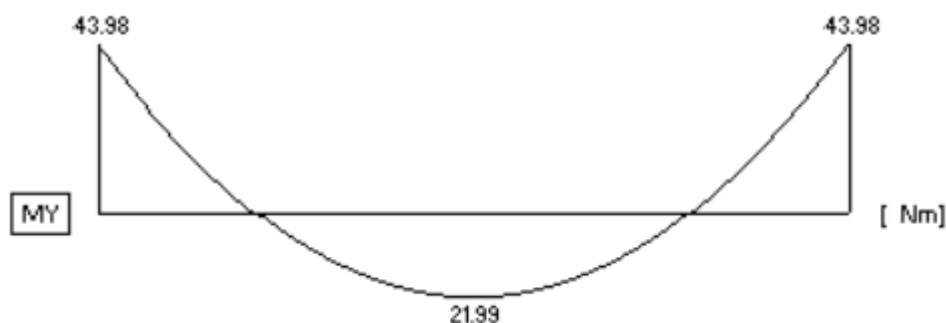


Figura 40 Gráfico de momento flector en estructura soporte.

A continuación vamos a calcular el módulo de sección plástico en torno al eje x (Z_x), basándonos en el momento hallado, para lo cual necesitamos como dato el límite de tensión de fluencia mínima (F_y) especificada por el tipo de acero, que en nuestro caso es un acero A36 con límite de tensión de fluencia de 250 MPa, para lo cual utilizaremos la siguiente ecuación:

$$M_n = M_p = F_y * Z_x$$

$$Z_x = \frac{M_p}{F_y} = \frac{43.98 \text{ [N * m]}}{250000000 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]} = 0.00000018 \text{ [m}^3\text{]}$$

A continuación, se hará el análisis de sección para un tubo cuadrado de 1 plg de cara exterior y de espesor 2 mm, como se indica en la Figura 41, ya que este tubo es el más común en el mercado ecuatoriano.

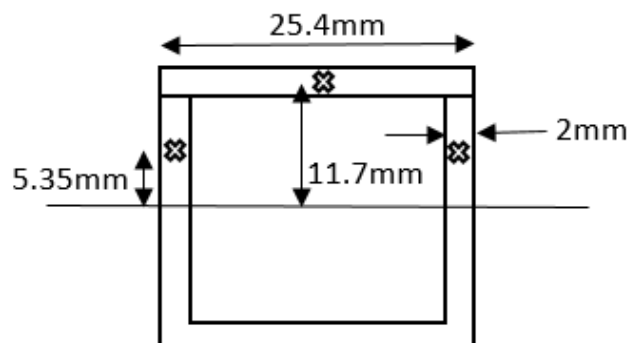


Figura 41 Sección de tubo cuadrado para estructura de soporte.

$$Z_x = 2[25.4 * 2 * 11.7 + 2 * 10.7 * 5.35 + 2 * 10.7 * 5.35]$$

$$Z_x = 2[594.36 + 114.49 + 114.49] = 1646.68 [mm^3]$$

$$Z_x = 0.0000016467 [m^3]$$

Para verificar que la sección seleccionada para nuestra estructura soporta las cargas que tenemos en nuestro proyecto, realizamos el cálculo del factor de seguridad, el cual relaciona el módulo de sección escogido anteriormente con el módulo de sección calculado obtenido a base de las cargas.

$$FS = \frac{Z_x(\text{Soporta})}{Z_x(\text{Necesita soportar})} = \frac{0.0000016467 [m^3]}{0.00000018[m^3]}$$

$$FS = 9.148$$

El factor de seguridad encontrado es aceptado y nos indica que nuestra estructura soporte diseñada con tubo de la sección escogida soporta las cargas a las que estará sometida.

3.3.2. Diseño del ducto

Las consideraciones para el diseño del ducto son la velocidad de aire que nos entrega el ventilador seleccionado y proporcionado por el laboratorio y el diámetro de salida de este.

$$V_o = 23 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\phi = 63.5 [mm] = 0.0635 [m]$$

Se calcula el caudal máximo entregado por el ventilador

$$Q_{caudal} = v * A = 23 * \pi * 0.03175^2 = 0.07284 \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

El caudal de salida debe ser para el área de un ducto cuadrado

$$Q_{caudal} = 0.07284 \left[\frac{m^2}{s} \right] = v * L^2$$

Por bibliografía consultada en el capítulo 1, las dimensiones recomendadas por fabricantes de este tipo de equipos se muestran en la siguiente Tabla 19.

Tabla 19

Dimensiones de equipos similares.

Equipo	Ancho del ducto	Largo del ducto
Armfield HT 19	15 cm	65 cm
Edibon TCLF	16 cm	70 cm
Dikoin IT 03.2	15 cm	70 cm
GUNT HAMBURG WL440	15 cm	55 cm
Generatoris TC-KT-400/PE	16 cm	80 cm

Como se observa en la Tabla 19, la longitud de lado del ducto cuadrado recomendado es de.

$$15 \text{ cm} \leq x \leq 16 \text{ cm}$$

En nuestro caso se escogió un valor de.

$$L = 15 \text{ cm}$$

Obteniendo así una velocidad de salida de.

$$0.07284 \left[\frac{m^2}{s} \right] = v * 0.15^2$$

$$v = 3.2373 \left[\frac{m}{s} \right]$$

El diseño del equipo está orientado a prácticas con un fluido turbulento, por tal motivo, el número de Reynolds debe ser mayor a 4000, por lo cual se calculará con fluido aire a temperatura ambiente y con la velocidad encontrada anteriormente.

$$T^\circ = 23^\circ C = 296^\circ K$$

$$v_{\text{viscosidad cinemática}} = 15.1776 \times 10^{-6}$$

$$Re = \frac{v_{\text{velocidad}} * D_{\text{diámetro hidráulico}}}{\nu_{\text{viscosidad cinemática}}}$$

Para un tubo cuadrado, el diámetro hidráulico se lo calcula de la siguiente manera.

$$D_{\text{diámetro hidráulico}} = \frac{4 * A_{\text{área}}}{P_{\text{perímetro}}} = \frac{4 * L * L}{L + L + L + L} = L$$

Entonces tenemos en la ecuación de número de Reynolds.

$$Re = \frac{3.2373 * 0.15}{15.1776 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 31994.1888$$

El número de Reynolds obtenido es mayor a 4000, por lo que el lado del ducto cuadrado de 15 cm es aceptable para el motor con las características antes presentado.

Para la longitud del ducto la bibliografía consultada resumida en la Tabla 19 comprende ductos de.

$$55 \text{ cm} < x < 80 \text{ cm}$$

Predominando 70cm, el cual fue seleccionado para nuestro caso.

$$l = 70 \text{ cm}$$

3.3.3. Diseño de caja térmica

La caja térmica será fabricada con acero inoxidable ASTM A240/480, la cual tendrá que almacenar y sostener a la niquelina, además deberá soportar la capacidad calorífica generada por la niquelina. También deberá brindar soporte a los turbuladores, el dimensionamiento de esta, debe calzar de tal forma que evite la fuga de flujo del ducto, para lo cual se utilizará un aislante térmico entre la caja y el ducto.

La caja térmica estará conformada por dos cajas de diferente tamaño, una recubriendo a la otra y entre estas existirá un aislante de lana cerámica, para aislar el calor generado por la niquelina dentro de la caja interna y evitar la fuga de calor a la caja externa y así prevenir quemaduras con altas temperaturas.

El diseño de la caja pequeña se muestra en la Figura 42, el de la caja grande en la Figura 43 ,y de ambas cajas conformando la caja térmica se encuentra detallado en la siguiente Figura 44.

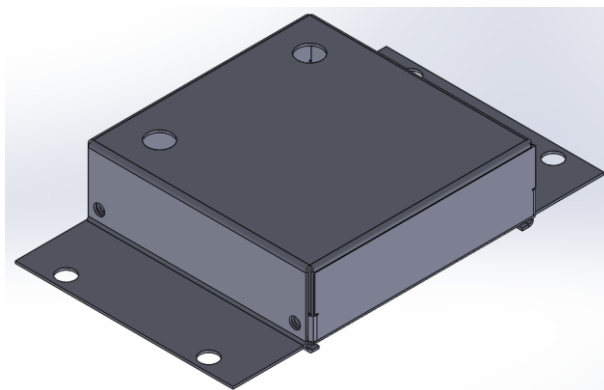


Figura 42 Diseño de caja pequeña de caja térmica.

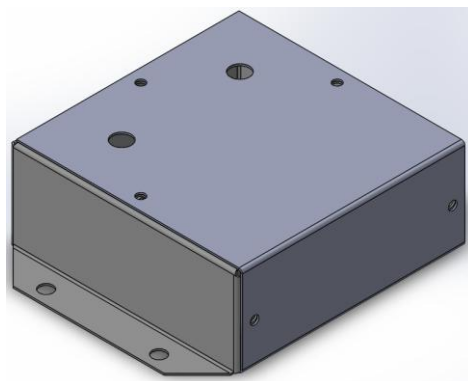


Figura 43 Diseño de caja grande de caja térmica.

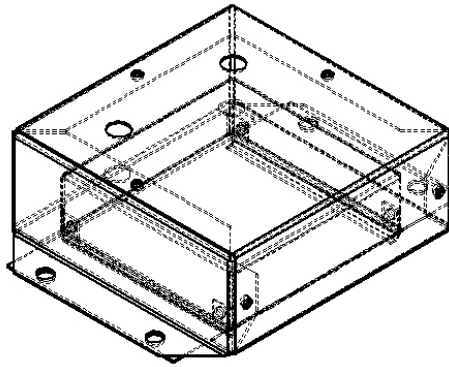


Figura 44 Diseño de caja térmica total.

3.3.4. Diseño de turbulador de espigas

Para determinar la cantidad de espigas que deberá tener este turbulador se realizará un análisis sobre el área libre y en contacto con la caja térmica.

$$A_{\text{caja térmica}} = 90 \text{ cm}^2$$

$$\emptyset_{\text{espiga}} = 1.27 \text{ cm}$$

$$L_{\text{dist entre espigas}} = 1.27 \text{ cm}$$

Por lo que se determina que el diámetro a ocupar por cada espiga incluyendo su separación de otras espigas es:

$$\emptyset_{\text{espiga total}} = 2.54 \text{ cm}$$

En donde tenemos que el área ocupada por cada espiga será de:

$$A_{\text{espiga total}} = \pi * r^2 = \pi * 1.27^2 = 5.067 \text{ cm}^2$$

Dividiendo el área total de caja térmica para el área total de cada espiga tendremos la cantidad de espigas necesarias en nuestro diseño.

$$\#_{\text{espigas}} = \frac{A_{\text{caja térmica}}}{A_{\text{espiga total}}} = \frac{90}{5.067} = 17.77$$

Entonces obtenemos que nuestro turbulador tendrá 18 espigas.

Para seleccionar la distribución de este turbulador tenemos dos tipos, escalonada y lineal como se observa en la Figura 45. Para definir qué distribución tendrá será necesario comprobar al relacionar las medidas de dichas distribuciones.

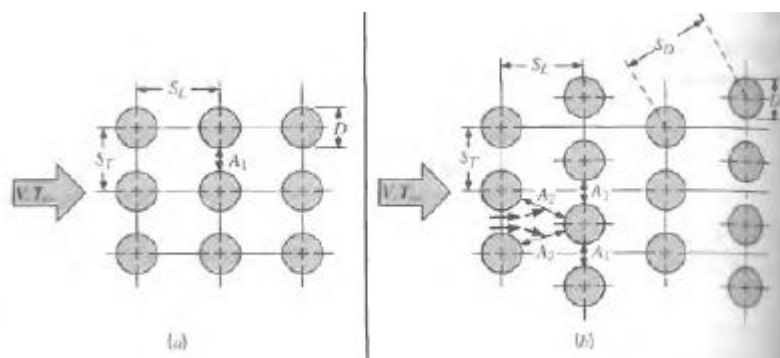


Figura 45 Tipos de distribución de espigas.

Fuente: (Incropera F. P., 1999, pág. 378)

Para la distribución lineal de 18 espigas en de $\varnothing = 1.27\text{cm}$ en un área total de 90 cm^2 , son dos, como se muestra en la Figura 46 y Figura 47

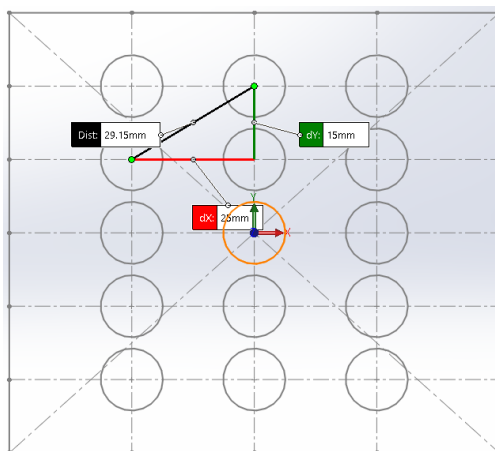


Figura 46 Distribución 1.

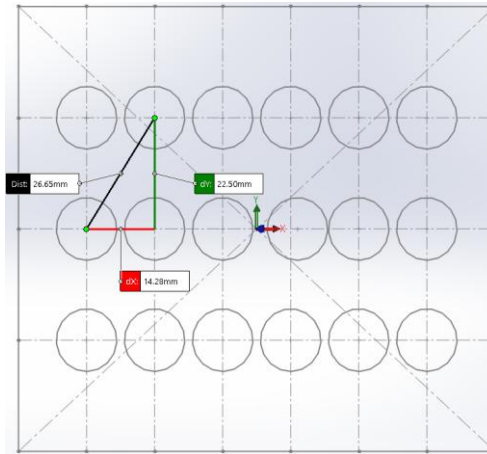


Figura 47 Distribución 2.

En donde la relación existente entre la distancia de fila a fila y columna a columna nos indicaran si es factible dichas distribuciones.

$$S_{L1} = dX = 2.5cm$$

$$S_{T1} = dY = 1.5cm$$

$$S_{L2} = dX = 1.428cm$$

$$S_{T2} = dY = 2.25cm$$

$$\frac{S_{T1}}{S_{L1}} = \frac{1.5}{2.5} = 0.6 < 0.7$$

$$\frac{S_{T2}}{S_{L2}} = \frac{2.25}{1.428} = 1.58 < 2$$

El análisis de estas relaciones, las comparamos en la siguiente Figura 48, la cual nos indica que configuración nos conviene.

Configuración
Alineado
Escalonado
Alineado
Escalonado
Alineado
$(S_T/S_L > 0.7)^a$
Escalonado
$(S_T/S_L < 2)$
Escalonado
$(S_T/S_L > 2)$
Alineado
Escalonado

Figura 48 Selección de configuración de diseño.

Fuente: (Incropera F. P., 1999, pág. 380)

Para la primera distribución, en donde es < 0.7 , nos indica que la transferencia es ineficiente en la combinación de espigas alineados, mientras que para la segunda distribución obtenemos $1.58 < 2$, lo que nos señala q la única distribución para esta relación es de forma escalonada, de tal forma que se descarta las dos opciones de configuración lineal.

La siguiente distribución es escalonada, como se puede ver en la siguiente Figura 49.

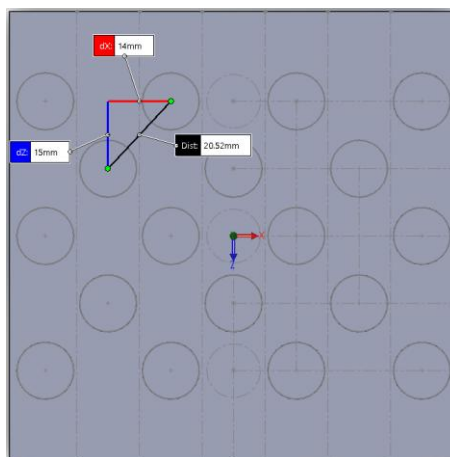


Figura 49 Distribución escalonada.

Y tenemos de esta forma la relación.

$$S_{L3} = dX = 1.4cm$$

$$S_{T3} = dZ = 1.5m$$

$$\frac{S_{T2}}{S_{L2}} = \frac{1.5}{1.4} = 1.07 < 2$$

Al realizar la comparación entre los datos obtenidos, se concluye que la mejor distribución de las 18 espigas, es escalonado,

El turbulador de espigas será fabricado con aluminio, el cual tendrá la función de pasar el calor generado por la caja térmica hacia dentro del ducto, además funcionara como turbulador, es decir cambiando la dirección del fluido dentro del ducto, como se observa en la Figura 50, Figura 51, Figura 52.

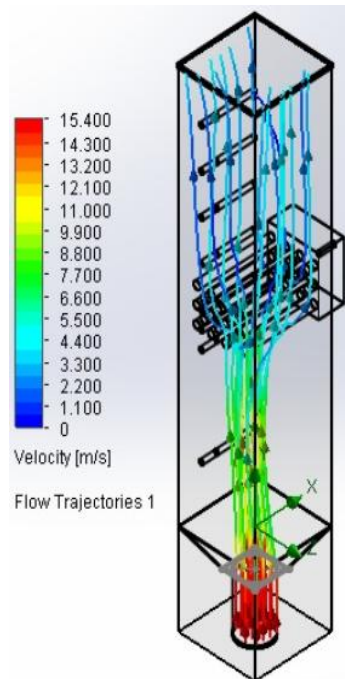


Figura 50 Vista isométrica de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de espigas.

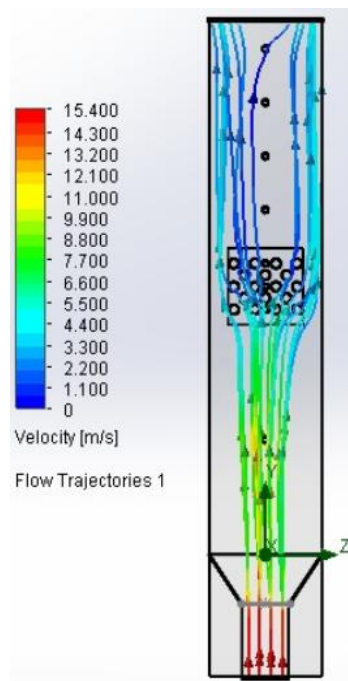


Figura 51 Vista frontal de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de espigas.

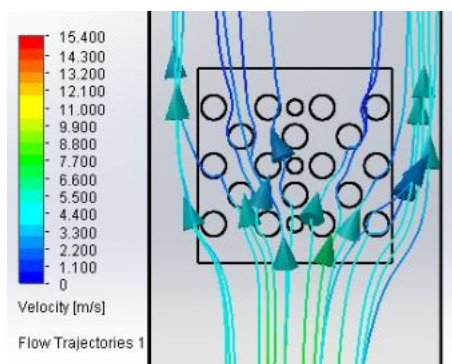


Figura 52 Vista frontal con acercamiento de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de espigas.

El turbulador, estará conformado por 16 espigas de aluminio de dimensiones $\text{Ø}12.7\text{mm}$ x 150mm y una placa base de dimensiones 100mm x 100mm x 3mm, la cual sostiene todas las espigas y que será montada sobre la caja térmica.

El diseño del turbulador se encuentra mostrado en la Figura 53.

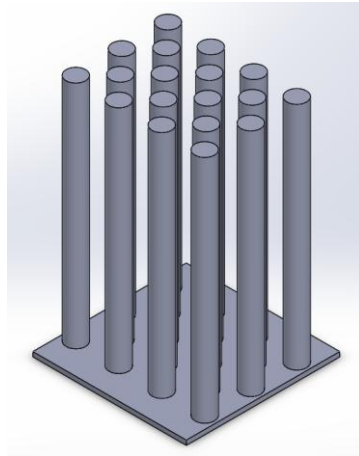


Figura 53 Diseño de turbulador de espigas.

3.3.5. Diseño de turbulador de aletas

El turbulador de aletas será diseñado de manera experimental, permitiendo así que el estudiante pueda comparar resultados obtenidos en la práctica y tomar decisiones sobre aplicaciones de este tipo.

El turbulador de aletas será fabricado con aluminio, el cual tendrá la función de pasar el calor generado por la caja térmica hacia dentro del ducto, además funcionara como turbulador, es decir cambiando la dirección del fluido dentro del ducto, como se observa en la Figura 54, Figura 55, Figura 56.

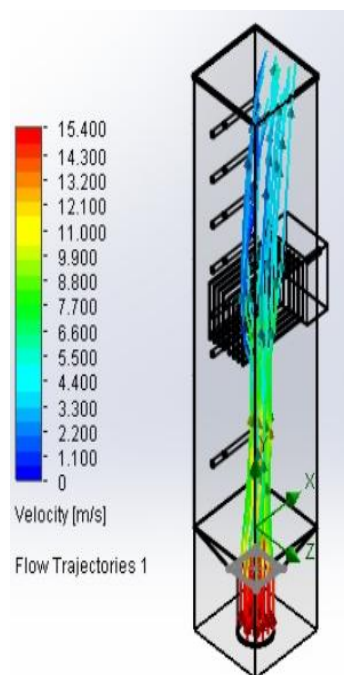


Figura 54 Vista isométrica de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de aletas.

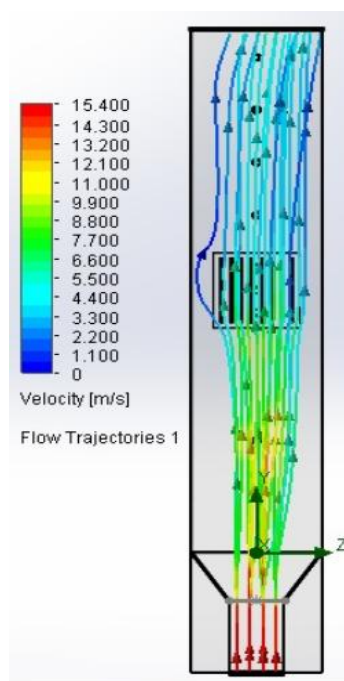


Figura 55 Vista frontal de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de aletas.

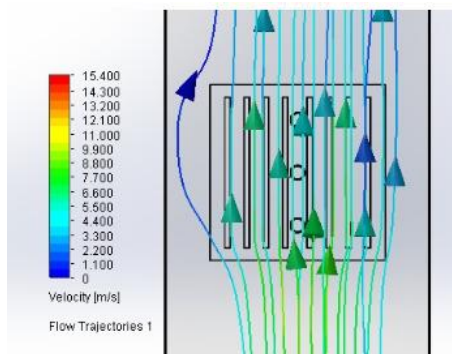


Figura 56 Vista frontal con acercamiento de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de aletas.

El turbulador, estará conformado por 8 placas de aluminio de dimensiones 86mm x 3mm x 150mm y una placa base de dimensiones 100mm x 100mm x 3mm, la cual sostiene todas las aletas y que será montada sobre la caja térmica.

El diseño del turbulador se encuentra mostrado en la Figura 57.

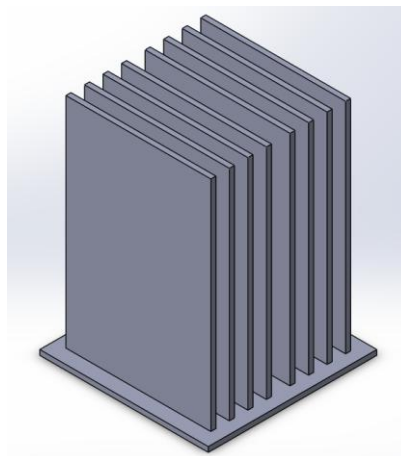


Figura 57 Diseño de turbulador de aletas.

3.3.6. Diseño de turbulador de cara plana

El turbulador de cara plana será diseñado de manera experimental, permitiendo así que el estudiante pueda comparar resultados obtenidos en la práctica y tomar decisiones sobre aplicaciones de este tipo.

El turbulador de cara plana será fabricado con aluminio, el cual tendrá la función de pasar el calor generado por la caja térmica hacia dentro del ducto, este diseño funciona como turbulador, ya que cualquier interferencia en el flujo influye en la trayectoria de aire cambiando la dirección del fluido dentro del ducto, como se observa en la Figura 58, Figura 59.

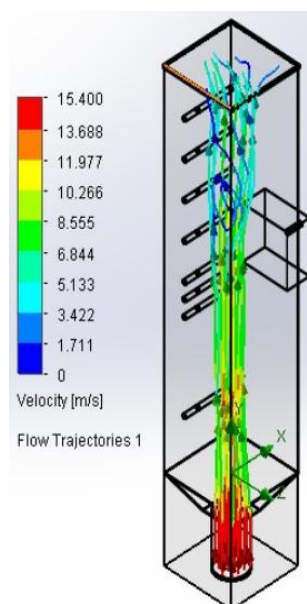


Figura 58 Vista isométrica de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de cara plana.

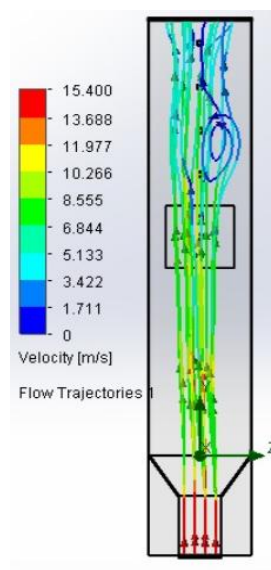


Figura 59 Vista frontal de simulación de flujo a través del ducto con velocidad de 15 m/s en turbulador de cara plana.

El turbulador, estará conformado por una placa base de dimensiones 100mm x 100mm x 3mm, el será montada sobre la caja térmica.

El diseño del turbulador se encuentra mostrado en la Figura 60.

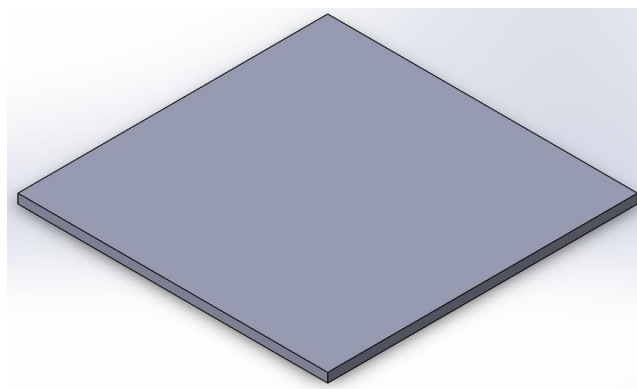


Figura 60 Diseño de turbulador de cara plana.

3.4. Diseño eléctrico / electrónico

3.4.1. Dimensionamiento de dispositivos de potencia

Los elementos de potencia previamente seleccionados son un motor AC y una niquelina con forma curva, facilitando de tal manera la implementación de estos elementos al equipo.

3.4.1.1. Ventilador AC

El ventilador AC seleccionado para la construcción del equipo, tiene las siguientes características, las cuales se indican en la siguiente Tabla 20

Tabla 20

Características de ventilador AC seleccionado.

CARACTERISTICA	VALOR
Marca	CENTURY TOOLS
Modelo	VN-25

CONTINÚA

Voltaje	110 [V]
Tamaño de salida de flujo	2 1/2 ''
Amperaje	3 [A]
Frecuencia	60 [Hz]
R.P.M	3600 rpm
Velocidad mínima	0 [m/s]
Velocidad máxima	23.40 [m/s]

Se escogió este ventilador, ya que la velocidad de aire que nos entrega se encuentra dentro del rango deseado para realizar prácticas con fluidos turbulentos. Como se observa en el diseño del ducto el ventilador fue escogido dependiendo la velocidad que puede entregarnos.

3.4.1.2. Niquelina

La forma de la niquelina seleccionada es curva, ya que con esta forma cubrimos la cara que deseamos calentar, esta niquelina tiene las características mostradas en la Tabla 21.

Tabla 21

Características de niquelina seleccionada.

CARACTERISTICA	VALOR
Resistencia	94 Ω
Voltaje	220 [V]
Potencia	515 [W]
Corriente máxima	2.5 [A]
Temperatura máxima	460 °C

La temperatura de la niquelina será controlada de tal forma que las practicas a realizar lo necesiten.

3.4.2. Circuito de potencia

Para el diseño de los circuitos de cada elemento de potencia, se tomaron materiales que soporten corrientes, voltajes y potencias, a utilizar en cada elemento.

3.4.2.1. Ventilador AC

El circuito que controla la velocidad del ventilador AC, que se utilizo es un dimmer comercial, el cual tiene las características mostradas en la siguiente Tabla 22.

Tabla 22

Características de dimmer comercial seleccionado.

CARACTERISTICA	VALOR
Voltaje	125 / 250 [V]
Potencia máxima	400 [W]

El dimmer será controlado por señal PWM, la cual varia la posición de este, permitiéndonos un control de velocidad en función de la señal PWM.

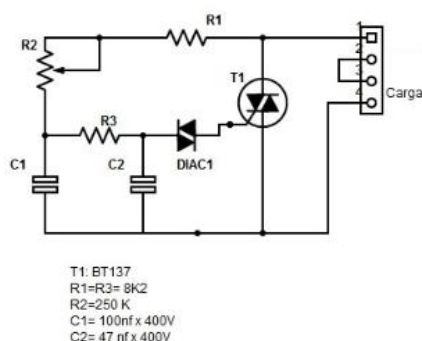


Figura 61 Diagrama eléctrico de dimmer comercial utilizado.

3.4.2.2. Niquelina

Para la niquelina es necesario un circuito que permita variar el voltaje por medio de una señal PWM para lo cual se utilizó los materiales indicados en la siguiente Tabla 23.

Tabla 23

Materiales utilizados en el circuito de control de niquelina.

CODIGO	ELEMENTO	VALOR
R1	Resistencia	1 K Ω
U1	MOC	4N35
R2 – R3	Resistencia	33 K Ω
R4	Resistencia	220 Ω
R5	Resistencia	22 K Ω
D1	Diodo Zener	10V 0W4
D2	Diodo	1N4007
C1	Capacitor electrolítico	2.2 uF
C2	Capacitores de polyester	220 nF
Q1	Mosfet	IRFP240
BR1	Puente de diodos	BR86
J1	Conector de entrada	4 pines
J2 – J3	Borneras	2 pines

Con los materiales descritos anteriormente, el circuito diseñado para el control de la niquelina se muestra en la Figura 62.

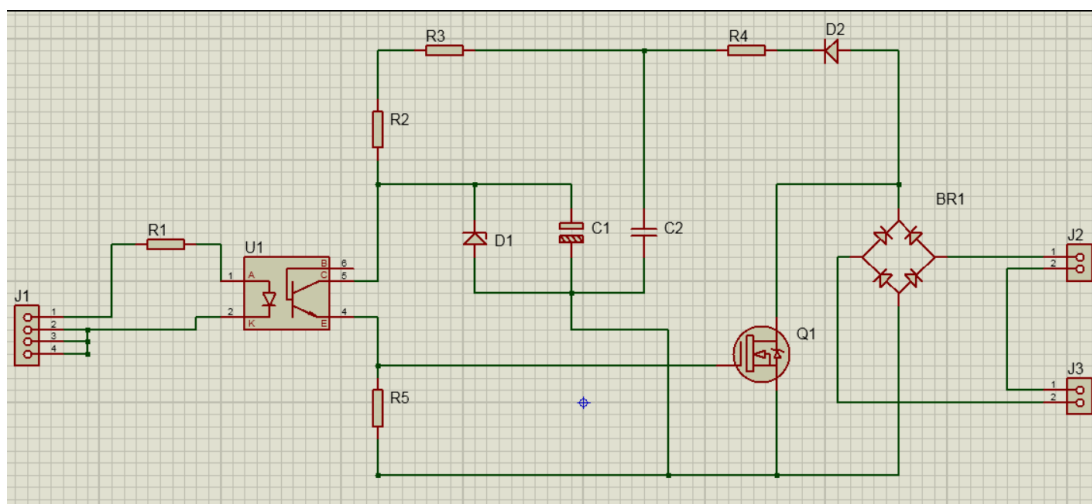


Figura 62 Diagrama de circuito de control de niquelina.

3.4.3. Dimensionamiento de dispositivos de control

Los elementos de control seleccionados son escogidos por su fácil instalación, su fácil uso y mantenimiento en el caso de ser necesario, además existen en el mercado nacional y cumplen con los propósitos planteados.

3.4.3.1. Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura seleccionados son termocupla de tipo K, en forma de tornillo, las características de este dispositivo se muestran en la siguiente Tabla 24.

Tabla 24

Características de termocupla seleccionada.

CARACTERISTICA	VALOR
Tipo	K
Rango de temperatura	0 – 500 °C
Diámetro de rosca	6 mm
Aislamiento interno	Fibra de vidrio
Blindaje externo	Malla metálica
Longitud total	2 m
Tenedor de separación de terminales	3.5 mm

3.4.3.2. Tarjeta de control y adquisición de datos

La tarjeta de control seleccionada para adquisición y escritura de datos es AT Mega 2560, la cual tiene las siguientes características mostradas en la Tabla 25.

Tabla 25

Características de microcontrolador seleccionado.

CARACTERISTICA	VALOR
Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de Funcionamiento	5 V
Voltaje de entrada	7 – 12 V
Pines de E/S digitales	54 de los cuales 15 proporcionan salida PWM

CONTINÚA

Pines de entrada Analógica	16
Corriente DC por pin de E/S	20 mA
Corriente DC para pin 3.3V	50 mA
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

3.4.4. Circuitos de control

Los circuitos de control utilizados en el proyecto son diseñados de tal forma que pueden ser fácilmente reemplazables los módulos que estos contienen.

3.4.4.1. Sensores de temperatura

Para el acondicionamiento de los sensores tipo K se utilizó un módulo MAX 6675, el cual transforma las señales de voltaje de los sensores en señales digitales, los elementos utilizados en este circuito son los mostrados en la siguiente Tabla 26.

Tabla 26

Elementos utilizados en el circuito de sensores de temperatura.

CODIGO	MATERIAL	VALOR
J1	Conector de alimentación	2 Pines
Sensor 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9	Termocupla tipo K de tipo tornillo, utilizado en placas de calentamiento	0 – 500 °C
	Módulo MAX	6675
J2 – J3	Conectores de alimentación	2 Pines cada uno
J4	Conectores de señal	12 Pines
J5	Conectores de señal	18 Pines

Con los materiales descritos anteriormente, el circuito diseñado se muestra en la siguiente Figura 63.

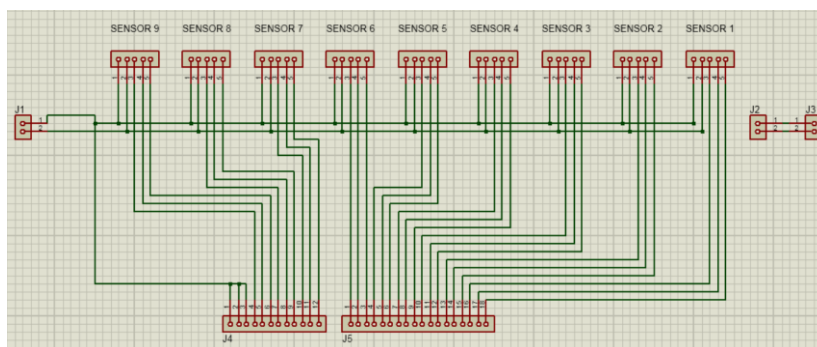


Figura 63 Diagrama de circuito de conexión de sensores.

3.5. Diseño sistema de control

Para los sistemas de control se toma datos y así poder encontrar una función que relacione nuestros parámetros a controlar.

3.5.1. Control de temperatura

Para delimitar las temperaturas que maneja el proyecto, es necesario conocer los límites de nuestros elementos, en nuestro caso la limitante principal es la capacidad del sensor, el cual alcanza los 500°C, para determinar nuestra temperatura máxima se realiza variación de voltaje permitiéndonos así controlar la temperatura máxima existente.

En la siguiente Tabla 27, se indica los valores de PWM, temperatura y voltaje controlados con el dissipador de cara plana dentro del ducto y dentro de la caja térmica.

Tabla 27

Valores de temperatura controlado con turbulador de cara plana.

PWM	VOLTAJE [V]	TEMPERATURA CAJA TÉRMICA [°C]	TEMPERATURA DENTRO DEL DUCTO [°C]
45	70	486	41
30	59	434	38.5
15	46	365	36

En la siguiente Tabla 28, se indica los valores de PWM, temperatura y voltaje controlados con el disipador de aletas dentro del ducto y dentro de la caja térmica.

Tabla 28

Valores de temperatura controlado con turbulador de aletas.

PWM	VOLTAJE [V]	TEMPERATURA CAJA TÉRMICA [°C]	TEMPERATURA DENTRO DEL DUCTO [°C]
60	80	462	78.5
45	69	399	73
30	58	338	65.5
15	44	279	60

En la siguiente Tabla 29, se indica los valores de temperatura y voltaje controlados con el turbulador de espigas dentro del ducto y dentro de la caja térmica.

Tabla 29

Valores de temperatura controlado con turbulador de espigas.

PWM	VOLTAJE [V]	TEMPERATURA CAJA TÉRMICA [°C]	TEMPERATURA DENTRO DEL DUCTO [°C]
60	83	462	95
45	69	402	85.5
30	55	346	78
15	42	277	67

De tal forma se restringe el rango máximo del equipo, el cual es de 486 °C, y así protegemos la capacidad del sensor que, en nuestro caso, su máxima lectura se da en 500 °C.

Con los datos obtenidos, podemos controlar el voltaje que recibe la niquelina, ya que si interpolamos los datos de Voltaje – PWM, obtenemos la siguiente ecuación.

$$PWM = -0.000006V^4 + 0.001V^3 - 0.044V^2 + 0.9552V - 3.7955$$

3.5.2. Control de flujo

El control de flujo que maneja el proyecto, va orientado a permitir realizar prácticas con flujos turbulento y laminares, los cuales se pueden determinar dependiendo de la velocidad de flujo que pase a través del ducto, para lo cual se tomó varios puntos relacionando ángulo de posicionamiento con velocidad de flujo, lo cual está indicado en la siguiente Tabla 30.

Tabla 30

Valores de flujo de ventilador dentro del ducto controlado .

Ángulo [°]	Velocidad de flujo [m/s]
90	8.7
95	11.3
100	15.1
105	17.2
110	19.2
115	20.4
120	21.2
125	21.8
130	22.3
135	22.6
140	22.9
145	23.1
150	23.2
155	23.3
160	23.3

De tal manera podemos controlar la velocidad de flujo dentro del ducto. Interpolando los datos obtenidos, podemos deducir la siguiente ecuación compuesta, la cual el sistema velocidad de flujo – ángulo.

$$\theta = \begin{cases} \frac{267}{8240}v^3 - \frac{100258}{81363}v^2 - \frac{882725}{52568}v + \frac{1300194}{82087}; 15 \leq v \leq 17 \\ \frac{1}{1524}v^6 - \frac{3895}{62178}v^5 + \frac{244135}{99721}v^4 - \frac{4837543}{96695}v^3 + \frac{44070189}{78325}v^2 - \frac{67907452}{20615}v + \\ \frac{263279849}{33254}; 18 \leq v \leq 23 \end{cases}$$

3.6. Diseño HMI

En la Figura 64 se indica la estructura y navegación que tendrá el HMI (Interfaz humano - máquina).

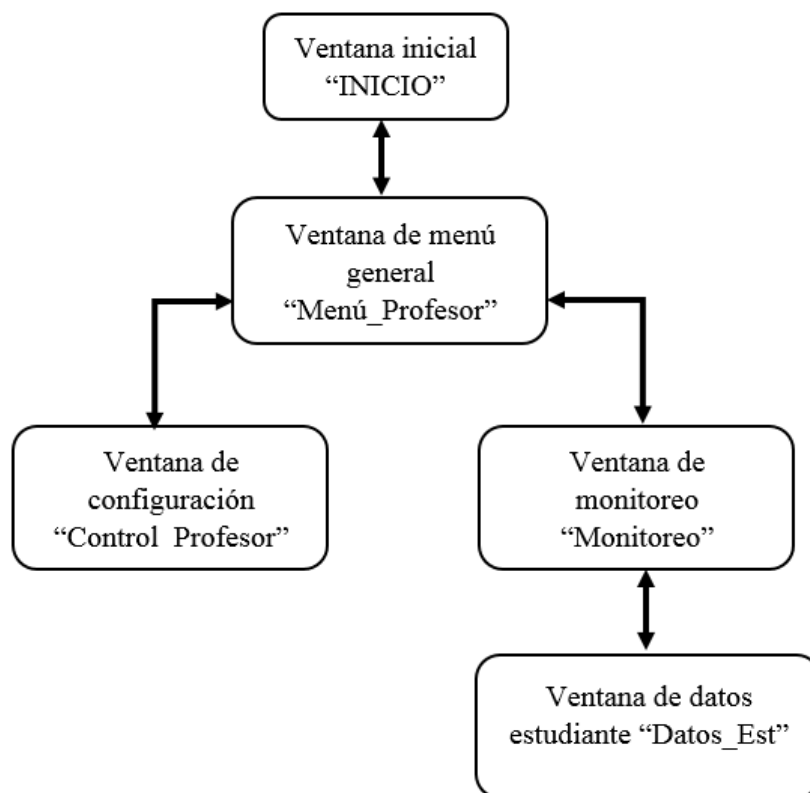


Figura 64 Diagrama de arquitectura y navegación del HMI.

3.7. Topología de red

En la Figura 65 se indica la topología de red utilizada para compartir datos entre el equipo y el ordenador del laboratorista.



Figura 65 Topología de red del equipo para compartir datos.

4. CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

4.1. Máquinas y herramientas

4.1.1. Máquinas

En la construcción del equipo se utilizan máquinas como:

- Torno
- Taladro de pedestal
- Dobladora
- Esmeril
- Soldadora eléctrica TIG
- Soldadura de arco eléctrico
- Fresadora

4.1.2. Herramientas

En la construcción del equipo se utilizan las siguientes herramientas:

- Taladro de mano
- Dermmel
- Cautin
- Brocas
- Fresas

- Cuchillas
- Destornillador plano y estrella
- Martillo
- Granete
- Entenalla
- Llaves
- Anemómetro

4.1.3. Instrumentos de medida

En la construcción del equipo se utilizan instrumentos de medida como:

- Pie de rey
- Flexómetro
- Regla
- Escuadras
- Nivel

4.2. Hojas de procesos

Las hojas de proceso descritas a continuación, se realizarán mediante diagramas de flujo de procesos, permitiéndonos una descripción sencilla de los procesos realizados, para lo cual se utilizará, simbología en los diagramas de flujo, mostrada en la siguiente Figura 66.

SIMBOLOGÍA DE ASME







ORIGEN		- Para identificar el paso previo que da origen al proceso, este paso no forma en sí parte del nuevo proceso.
OPERACIÓN		Hay una operación cada vez que una forma o documento es cambiado intencionalmente en cualquiera de sus características, cuando se une o engrapa o cuando se desune o desengrapa, cuando se prepara para otra operación, transporte o almacenamiento.
INSPECCIÓN		Hay una inspección cada vez que una forma o documento es examinado para identificarlo o para verificar su cantidad, calidad o características. El resultado de esta inspección puede ser: a) Corregir inmediatamente los errores. b) Rechazar la forma o documento. c) Devolverlo para que el error sea corregido. d) Comparar con otro documento.
TRANSPORTE		Hay un transporte cada vez que una forma o documento se mueve, excepto cuando dicho movimiento es parte de una operación o de una inspección.
DEMORA		Ocurre una demora a una forma o documento cuando las condiciones de trabajo no permiten o requieren la ejecución de la siguiente acción planeada.
ALMACENAMIENTO		Ocurre un almacenamiento cuando una forma o documento es guardado o protegido contra un traslado no autorizado; cuando es archivado permanentemente.

Figura 66 Simbología ASME para hoja de procesos por diagrama de flujo.

Fuente: (Bocanegra, 2012)

A continuación, se indica los diagramas de flujo de todos los elementos mecánicos que comprenden el equipo.

4.2.1. Diagrama de flujo de construcción de la estructura soporte

Las Estructura tubo cuadrado: 4 tubos estructurales ASTM A-500 de 1"x2mm x 6m

1 perfil L ASTM A36 30 mm x 2 mm

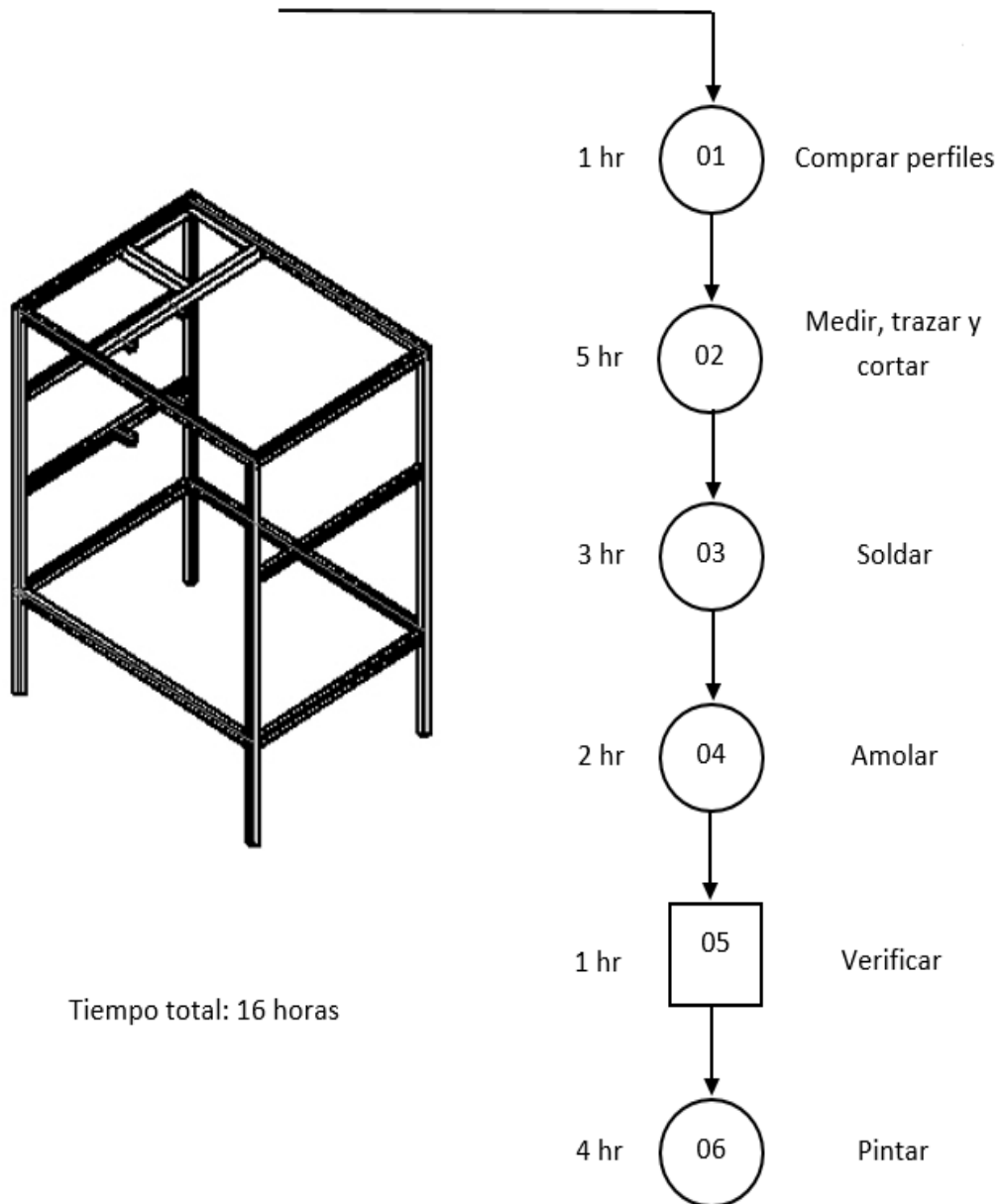


Figura 67 Diagrama de flujo - Estructura soporte.

4.2.2. Diagrama de flujo de construcción del ducto

Plancha acero inoxidable: 1 plancha ASTM A240/480 1mm de espesor.

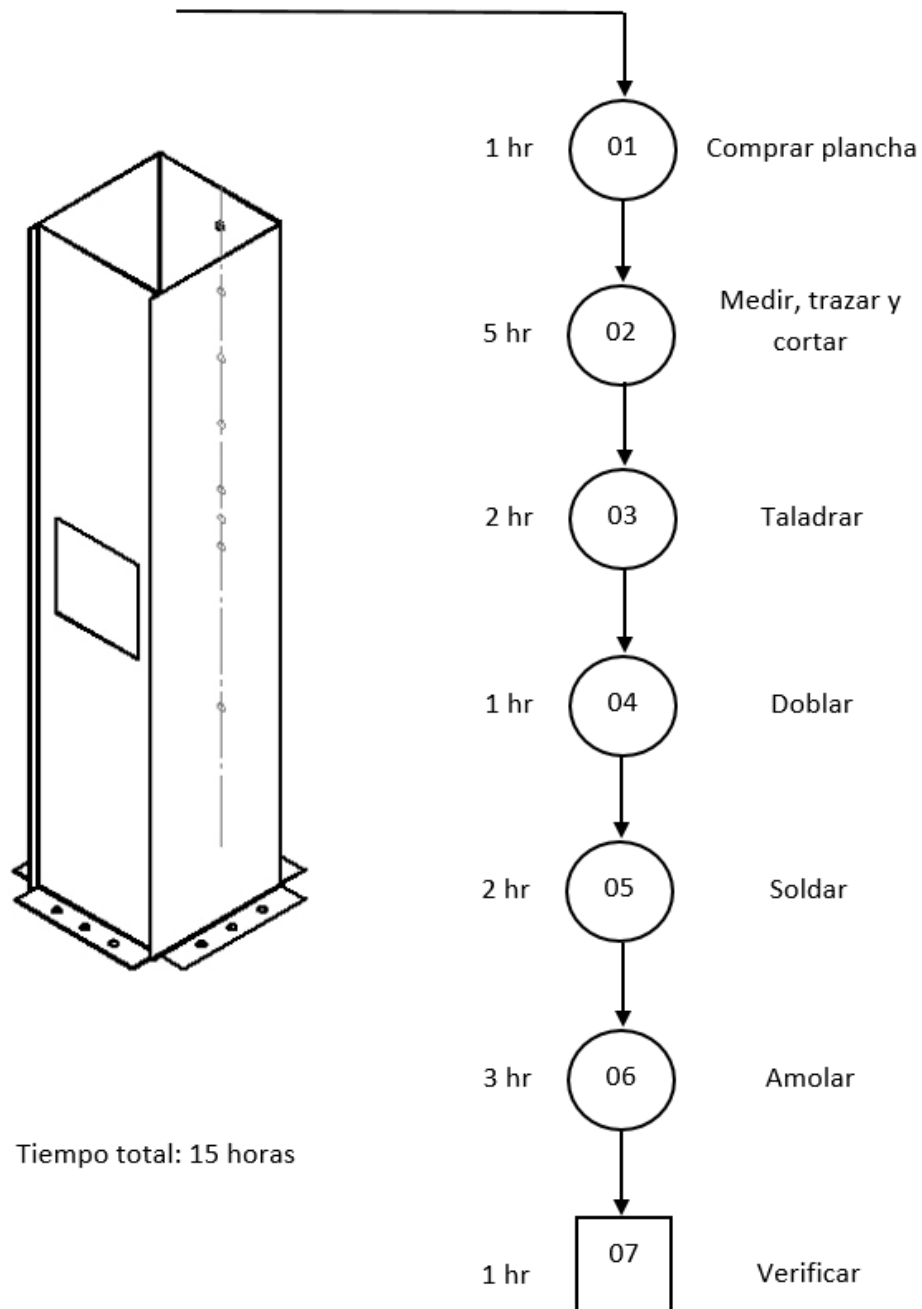


Figura 68 Diagrama de flujo - Ducto.

4.2.3. Diagrama de flujo de construcción de la tolva

Plancha acero inoxidable: 1 plancha ASTM A240/480 1mm de espesor.

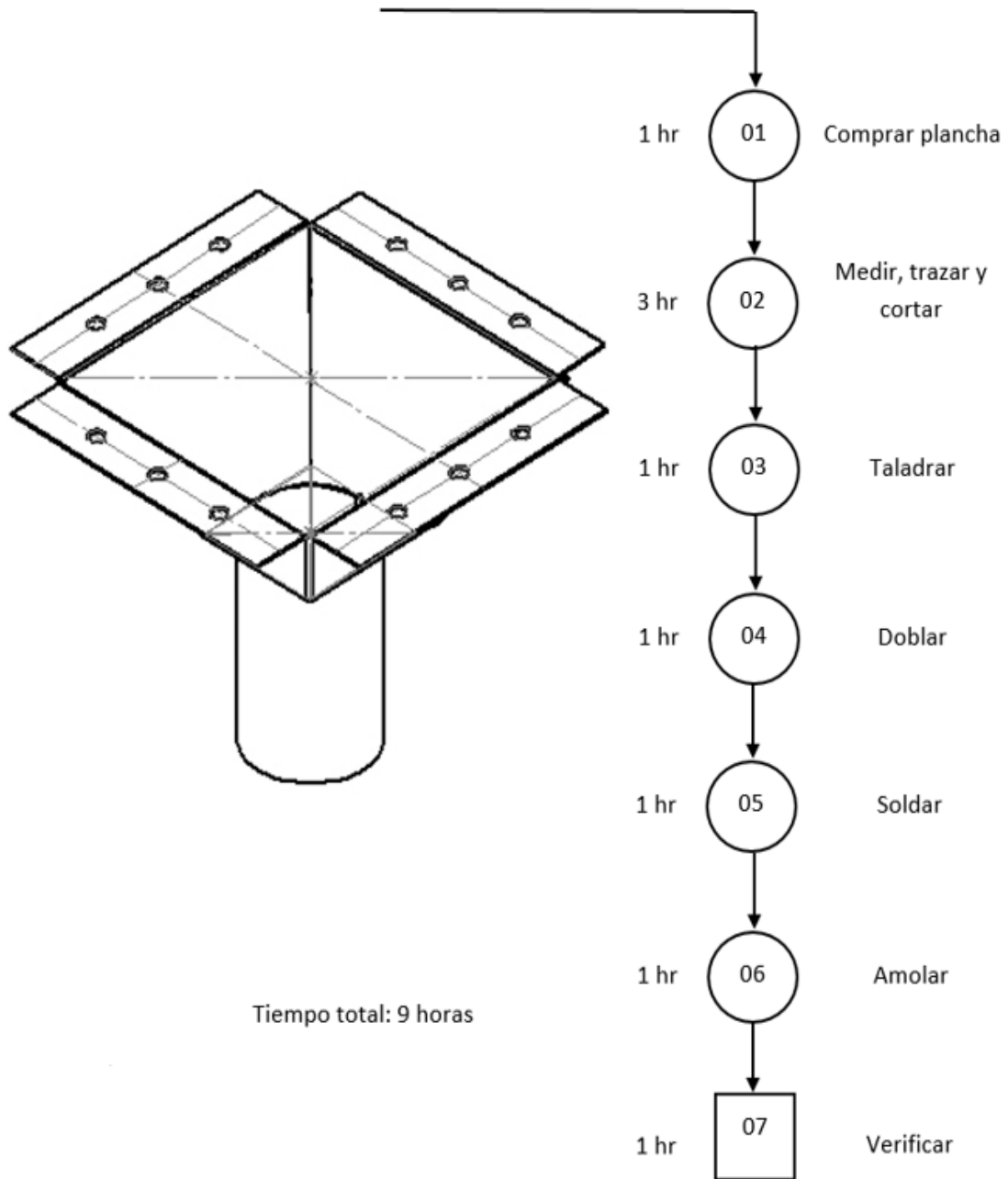


Figura 69 Diagrama de flujo - Tolva.

4.2.4. Diagrama de flujo de construcción de la caja térmica

Plancha acero inoxidable: 1 plancha ASTM A240/480 1mm de espesor.

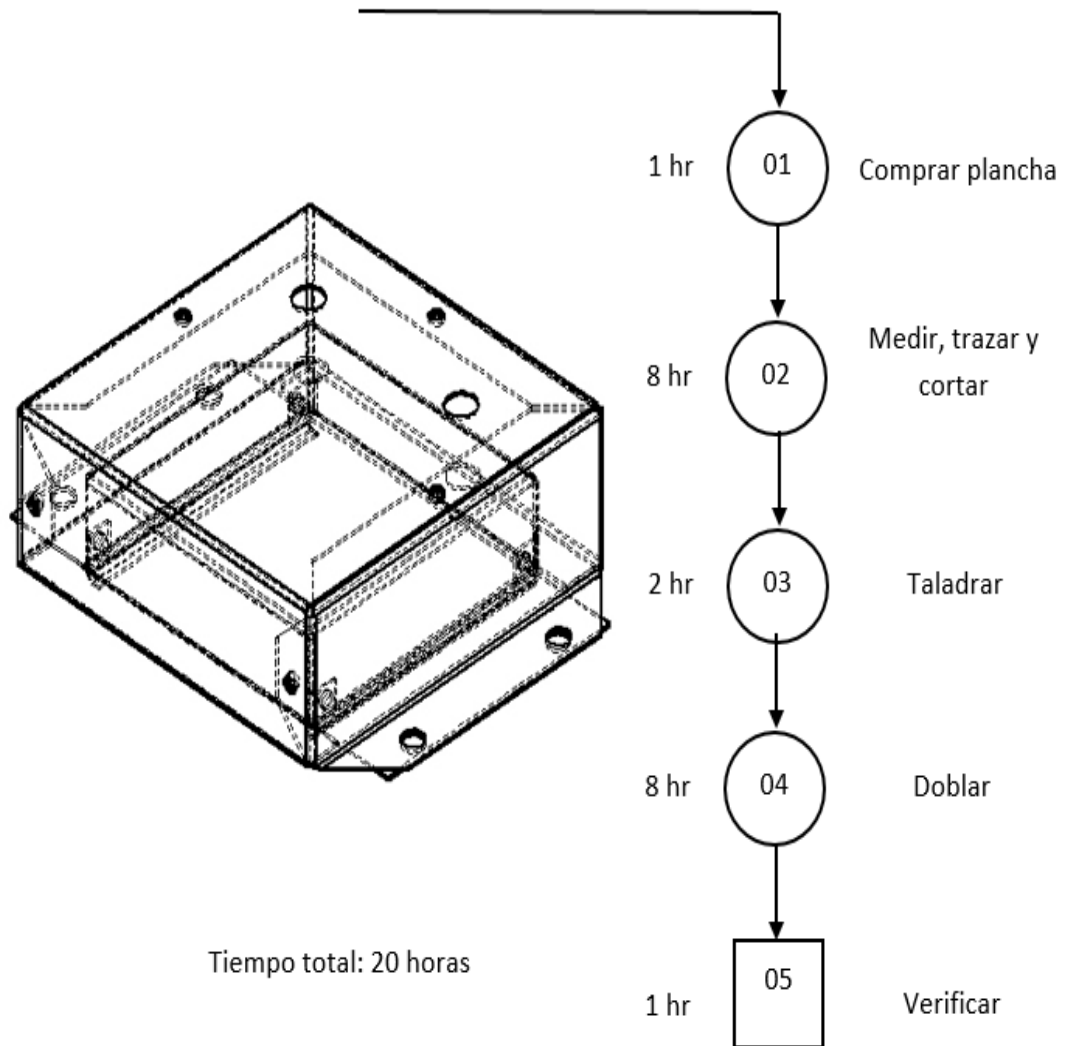


Figura 70 Diagrama de flujo - Caja térmica.

4.2.5. Diagrama de flujo de construcción de turbulador de aletas

Plancha de aluminio: 1 plancha 3mm de espesor

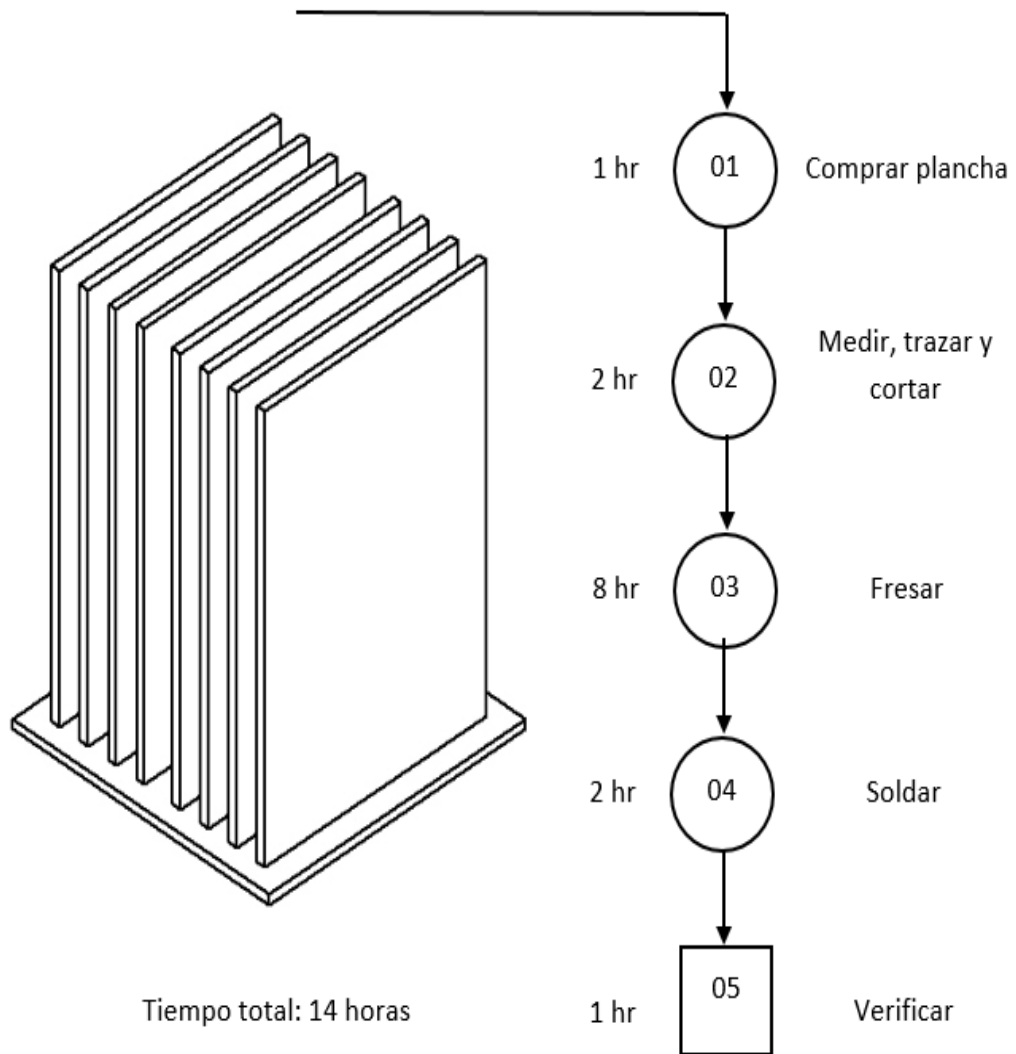


Figura 71 Diagrama de flujo – turbulador de aletas.

4.2.6. Diagrama de flujo de construcción de turbulador de espigas

Plancha de aluminio: 1 plancha 3mm de espesor

Eje aluminio 1/2" 3m

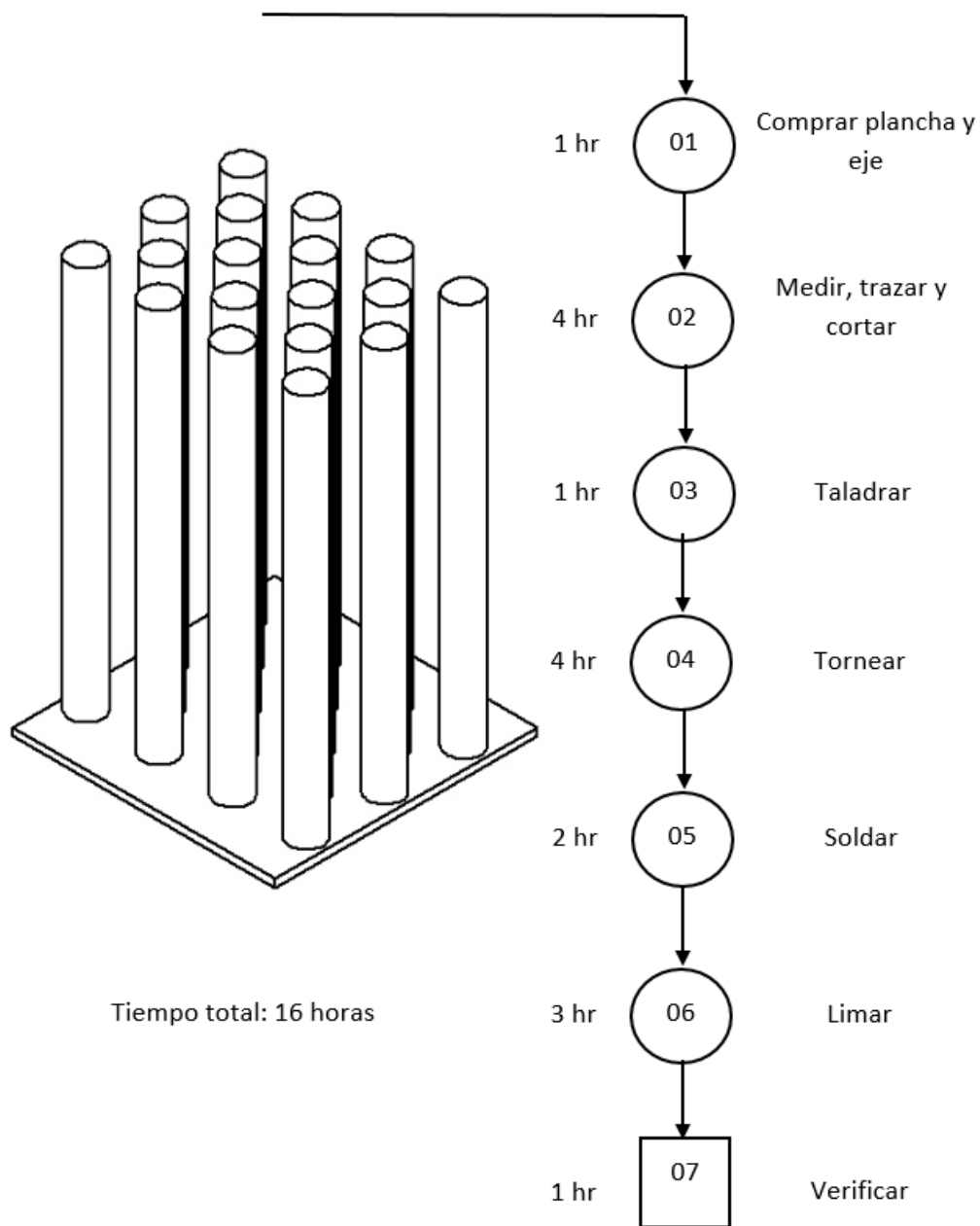


Figura 72 Diagrama de flujo - turbulador de espigas.

4.2.7. Diagrama de flujo de construcción de turbulador de cara plana

Plancha de aluminio: 1 plancha 3mm de espesor

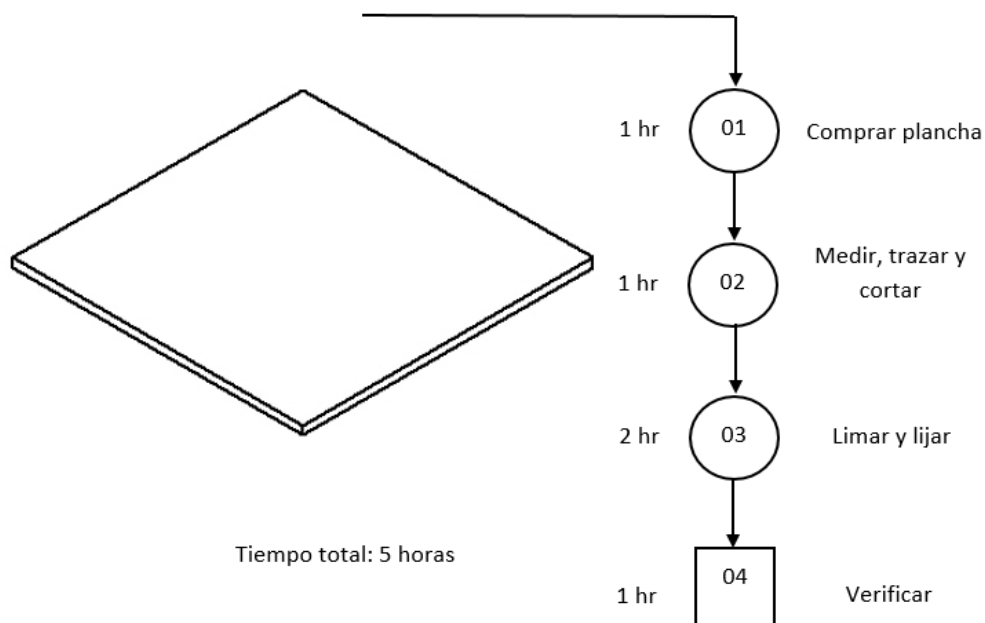


Figura 73 Diagrama de flujo - Turbulador de cara plana.

4.3. Construcción de circuito para sensores

El diseño realizado previamente del circuito para los sensores, nos permite construir una PCB de la forma que se muestra en la Figura 74.

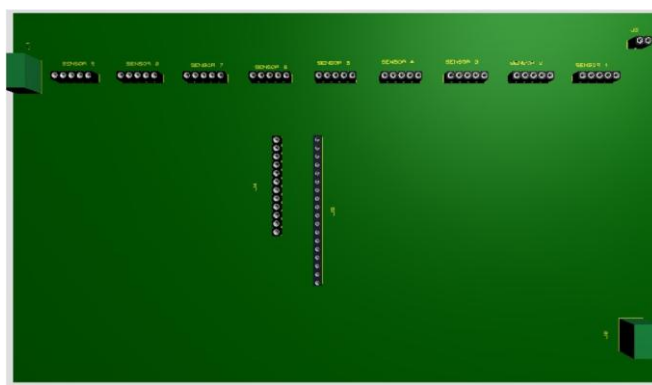


Figura 74 Diseño PCB de sensores.

Los elementos utilizados se detallan en la Tabla 26.

4.4. Construcción de circuito para control de temperatura de niquelina

El diseño realizado previamente del circuito de control para la niquelina, nos permite construir una PCB de la forma que se muestra en la Figura 75.

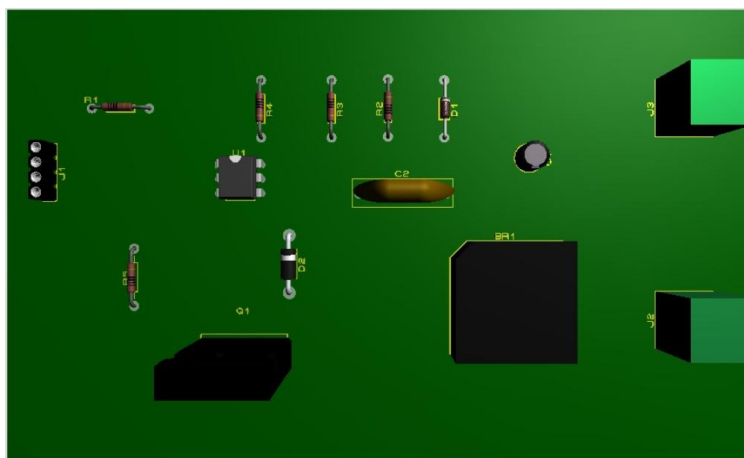


Figura 75 Diseño PCB de control de la niquelina.

4.5. Implementación del HMI

El diseño realizado previamente sobre arquitectura y navegación del HMI en la Figura 64 nos define la cantidad de ventanas que se debe implementar para el buen funcionamiento de esta. A continuación, se indica la distribución de cada una de ellas.

4.5.1. Ventana de “INICIO”

En la ventana de inicio mostrada en la Figura 76, se especifica el nombre del equipo.



Figura 76 Ventana de Inicio.

4.5.2. Ventana de menú general “Menu_Profesor”

En la ventana de menú general mostrada en la Figura 77, se puede seleccionar a que ventana se quiere dirigir como puede ser control y monitoreo, además se puede solicitar ayuda sobre el equipo con el botón de ayuda o regresar a la ventana de inicio pulsando sobre el botón salir.



Figura 77 Ventana de menú general.

4.5.3. Ventana de configuración “Control_Profesor”

En la ventana de configuración mostrada en la Figura 78, se puede seleccionar el tipo de turbulador a utilizar en la práctica, además se debe configurar el voltaje que entrara a la niquelina y la velocidad de flujo que se requiere tener dentro del ducto.

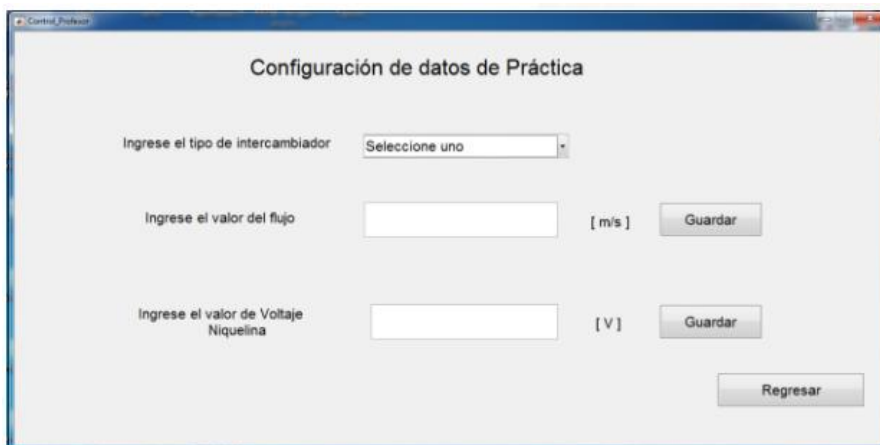


Figura 78 Ventana de configuración.

4.5.4. Ventana de monitoreo “Monitoreo”

En la ventana de monitoreo mostrada en la Figura 79, se puede iniciar el proceso con los datos anteriormente configurados, además se puede observar en tiempo real la variación de temperatura de todos los sensores, pero solo se puede observar el grafico del sensor 9 y del 3, también se observa el botón de emergencia para ser utilizado en cualquier fallo durante el funcionamiento del equipo.



Figura 79 Ventana de monitoreo.

4.5.5. Ventana de dato “Datos_Est”

En la ventana de datos mostrado en la Figura 80, se puede observar todos los datos obtenidos en la práctica, además se puede exportar los datos a una tabla Excel para ser analizados.

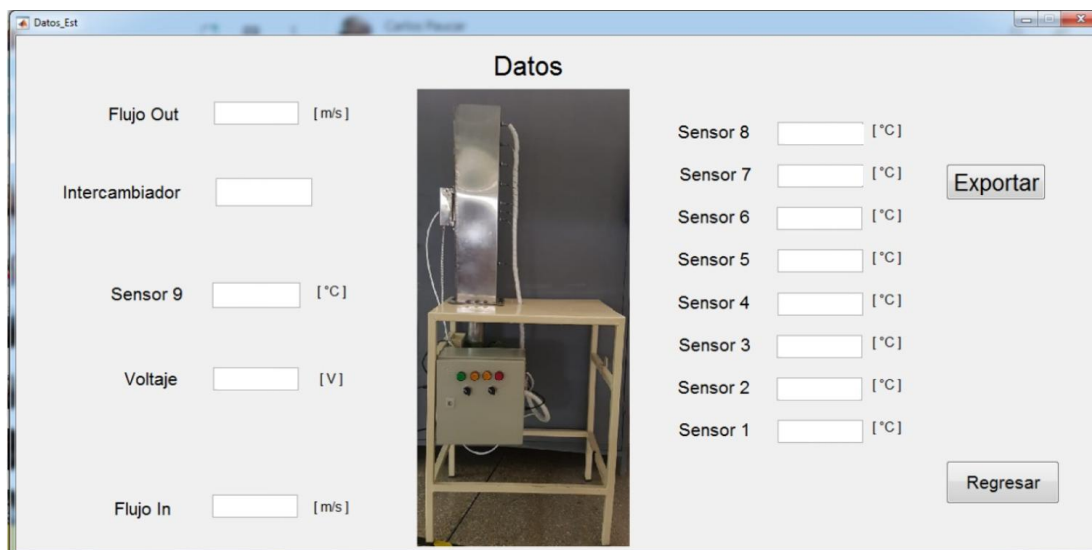


Figura 80 Ventana de datos.

4.6. Implementación de red

El HMI genera dos hojas de cálculo Excel al presionar el botón “Exportar”, las cuales son proporcionadas al estudiante y al laboratorista. El estudiante tiene acceso desde la misma computadora donde esta implementado el HMI, para que el laboratorista tenga acceso a su respectivo archivo, fue necesario crear una red entre el computador del equipo y el computador del laboratorista, utilizando una conexión a internet como se observa en la Figura 65.

5. CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. Ecuaciones utilizadas para cálculos

Las ecuaciones utilizadas en los cálculos realizados por el equipo, fueron determinadas tomando en cuenta la siguiente Tabla 31. (Karlekar.B, 1995)

Tabla 31
Valores de propiedades de aire a presión atmosférica.

T [°K]	ν [m ² /s]	k [W/m K]	Pr
250	9.49	0.02227	0.722
300	15.68	0.02624	0.708
350	20.76	0.03003	0.697

Para el uso de los datos mostrados en la Tabla 31, es necesario interpolar los valores y encontrar el valor correspondiente en el rango de temperaturas, para lo cual se buscó una forma general de interpolación en cada rango, obteniendo así las siguientes ecuaciones. (Karlekar.B, 1995)

- Interpolación ν (viscosidad cinemática) 250-300

$$\nu = (0.1256xT - 22)x10^{-6}$$

- Interpolación ν (viscosidad cinemática) 300-350

$$\nu = (0.1016xT - 14.8)x10^{-6}$$

- Interpolación k (conductividad térmica) 250-300

$$k = (0.0000794xT - 0.00242)$$

- Interpolación k (conductividad térmica) 300-350

$$k = (0.0000758xT + 0.0035)$$

- Interpolación Pr (Prandtl) 250-300

$$Pr = (-0.00028xT + 0.792)$$

- Interpolación Pr (Prandtl) 300-350

$$Pr = (-0.00022xT + 0.774)$$

Las ecuaciones utilizadas para los cálculos realizados en el programa fueron las siguientes.

(Karlekar.B, 1995)

- Diámetro hidráulico

$$D = a; a \text{ es un lado del ducto cuadrado}$$

- Reynolds

$$Re = \frac{v * D}{\nu}; v \text{ es velocidad de salida}$$

- Coeficiente de fricción

$$f = (0.79 * \ln(Re) - 1.64)^{-2}$$

- Nusselt por correlación de Petukhov

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} * Re * Pr}{1.07 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

- Coeficiente de transferencia de calor

$$h = \frac{Nu * k}{Lc}; Lc \text{ distancia entre sensores de medida}$$

- Calor

$$Q = h * A * \Delta T; \text{Area de sección del ducto}$$

5.2. Desarrollo de protocolo de pruebas

El protocolo de prueba nos indicara la secuencia y forma correcta de iniciar el equipo para realizar las prácticas necesarias.

- a. Verificar que los conectores de 220 V y 110 V, estén conectados a sus tomacorrientes correspondientes.
- b. Verificar que el cable USB del equipo esté conectado al computador que porta el HMI.
- c. Encender la fuente de poder, ubicada en la parte trasera del panel de control.
- d. Iniciar el HMI en el computador.
- e. Encender los switch de 110 V y 220V, que se encuentran en el panel de control, verificar que se enciendan los indicadores luminosos correspondientes.
- f. En la ventana “Configuración” del HMI, ingresar los valores deseados de velocidad de flujo y pulsar el botón “Guardar”, luego ingresar los valores deseados de voltaje de niquelina y pulsar el botón “Guardar”.
- g. En la ventana “Monitoreo” del HMI, pulsar el botón “Iniciar”, una vez iniciado el equipo, los indicadores luminosos del panel de control se apagarán y prenderán, indicando que los datos configurados fueron cargados en el equipo.
- h. Una vez iniciado el proceso, un indicador luminoso verde se encenderá en el panel de control, indicando que el equipo está en funcionamiento.
- i. Una vez terminado el proceso, es necesario medir el flujo de salida (se recomienda medir en las esquinas del equipo), para ingresar el dato en el HMI en la casilla de “Flujo Salida” en la ventana “Monitoreo” (el dato debe ser ingresado en m/s), y pulsar el botón “Guardar” en la ventana de “Monitoreo”.

- j. Una vez terminada la práctica, el usuario deberá pulsar el botón “Terminar” en la ventana “Monitoreo”, para indicar que el equipo ha terminado el proceso, los indicadores luminosos del panel de control se apagaran y prenderán solo los indicadores luminosos de alimentación eléctrica.
- k. Para la obtención de datos obtenidos en el proceso realizado, el usuario deberá pulsar el botón “Datos” en la ventana “Monitoreo”, lo cual llevará al usuario a la ventana “Datos”, en la cual se puede observar los datos obtenidos por el equipo cuando ha alcanzado el estado estable.
- l. En la ventana “Datos”, el usuario podrá exportar los datos obtenidos, pulsando el botón “Exportar”, el cual genera un archivo Excel para el estudiante, el cual debe ser utilizado para realizar los informes pedidos por el instructor, y se exporta un archivo Excel para el instructor con los datos obtenidos por el equipo y los resultados que deberá obtener el estudiante.

5.3. Pruebas y resultados del equipo en general

Se realizará pruebas con el equipo completamente funcional, y utilizando los tres turbuladores propuestos.

5.3.1. Turbulador de espigas

Para el turbulador de espigas se realizará nueve pruebas en los cuales están involucrados los valores máximos y mínimos de flujo y temperatura. La temperatura está controlada por el voltaje ingresado en el HMI del equipo.

5.3.1.1. Prueba 1: Voltaje máximo (80V) – Flujo mínimo (15m/s)

Una vez ingresado los datos de entrada como son el voltaje y el flujo inicial en el HMI e iniciada la práctica, en la ventana de Monitoreo se puede observar el proceso de calentamiento de la caja térmica (Sensor 9) y dentro del ducto en el utilizado (Sensor 3), además el flujo de salida obtenido con el anemómetro tiene que ser ingresado al final de la práctica como se muestra en la Figura 81,.

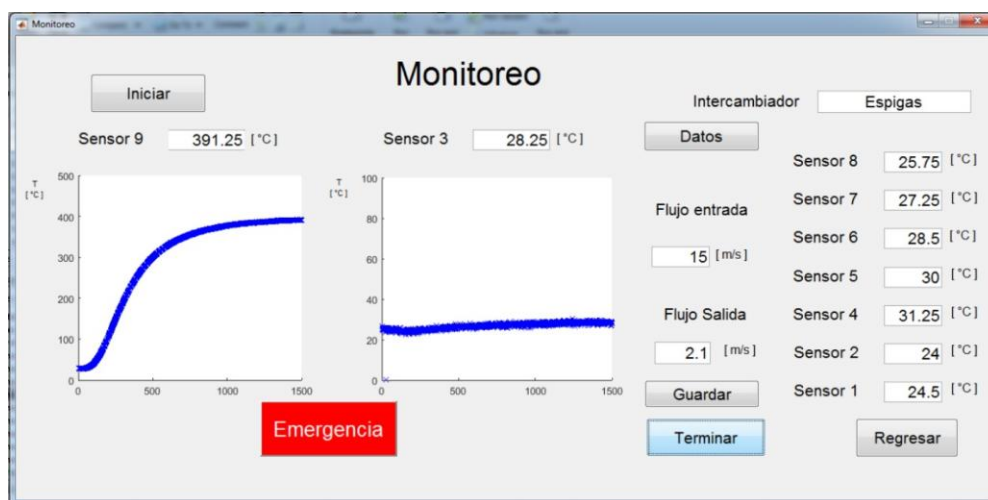


Figura 81 Ventana de monitoreo en prueba 1.

Después de terminada la práctica, y una vez pulsado el botón “Datos”, el HMI nos muestra la ventana de Datos, la cual se muestra en la Figura 82, y esta nos indica todos los datos obtenidos por el equipo.

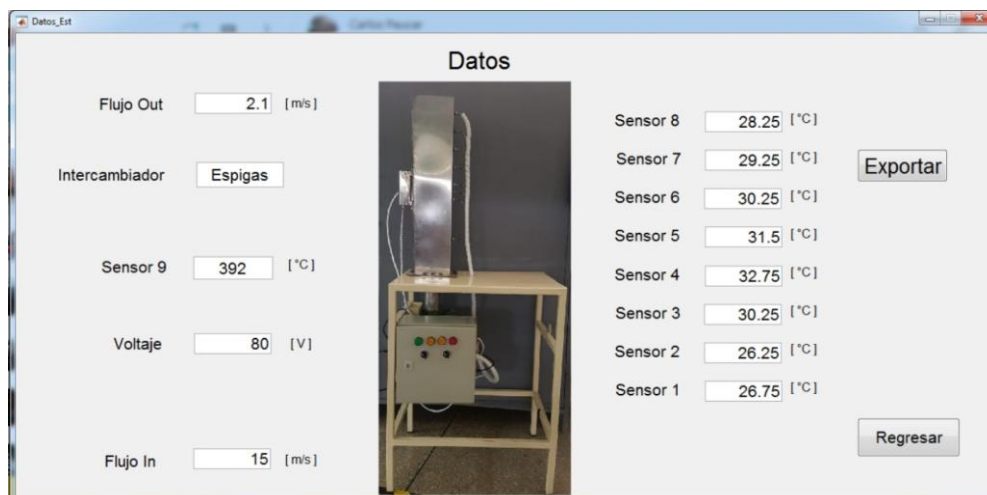


Figura 82 Ventana de datos en prueba 1.

Además en la ventana de “Datos” una vez pulsado el botón “Exportar” se genera dos hojas de cálculo en Excel con todos los datos obtenidos por el equipo y valores calculados en el programa, como se observa en la Tabla 32, además se genera una hoja de cálculo solo con los datos obtenidos por el equipo, la cual será proporcionada al estudiante.

Tabla 32

Resultados prueba 1 con turbulador de espigas.

Voltaje [V]	80	T [°C]	303.5
Flujo In [m/s]	15	Pr	0.70723
Flujo Out [m/s]	2.1	k [W/mK]	0.026505
Sensor 1 [°C]	26.75	γ [m ² /s]	1.6E-05
Sensor 2 [°C]	26.25	ΔT	4.5
Sensor 3 [°C]	30.25	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	32.75	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	31.5	Re	19643.79
Sensor 6 [°C]	30.25	F	0.026272
Sensor 7 [°C]	29.25	Nu	49.59473
Sensor 8 [°C]	28.25	h [W/m ² K]	4.694726
Sensor 9 [°C]	392	Q [W]	0.475341

5.3.1.2. Prueba 2: Voltaje máximo (80V) – Flujo medio (19m/s)

Para la prueba 2 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1”, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 33.

Tabla 33

Resultados prueba 2 con turbulador de espigas.

Voltaje [V]	80	T [°C]	301.75
Flujo In [m/s]	19	Pr	0.707615
Flujo Out [m/s]	3.12	k [W/mK]	0.026373
Sensor 1 [°C]	26.25	γ [m ² /s]	1.59E-05
Sensor 2 [°C]	25.75	ΔT	3.5
Sensor 3 [°C]	28.75	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	30.5	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	29.75	Re	29512.29
Sensor 6 [°C]	28.25	F	0.023733
Sensor 7 [°C]	27.5	Nu	66.79265
Sensor 8 [°C]	27	h [W/m ² K]	6.291069
Sensor 9 [°C]	370.75	Q [W]	0.495422

5.3.1.3. Prueba 3: Voltaje máximo (80V) – Flujo máximo (23m/s)

Para la prueba 3 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1”, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 34.

Tabla 34

Resultados prueba 3 con turbulador de espigas.

Voltaje [V]	80	T [°C]	301.125
Flujo In [m/s]	23	Pr	0.707753
Flujo Out [m/s]	3.77	k [W/mK]	0.026325
Sensor 1 [°C]	26.25	γ [m ² /s]	1.58E-05
Sensor 2 [°C]	26	ΔT	2.75
Sensor 3 [°C]	28.25	Dh [m]	0.15

CONTINÚA

Sensor 4 [°C]	29.5	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	29.25	Re	35804.06
Sensor 6 [°C]	28	F	0.022655
Sensor 7 [°C]	27.25	Nu	77.08812
Sensor 8 [°C]	26.75	h [W/m ² K]	7.247736
Sensor 9 [°C]	353.5	Q [W]	0.448454

5.3.1.4. Prueba 4: Voltaje medio (60V) – Flujo mínimo (15m/s)

Para la prueba 4 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1”, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 35.

Tabla 35

Resultados prueba 4 con turbulador de espigas.

Voltaje [V]	60	T [°C]	302.25
Flujo In [m/s]	15	Pr	0.707505
Flujo Out [m/s]	2.18	k [W/mK]	0.026411
Sensor 1 [°C]	26.25	γ [m ² /s]	1.59E-05
Sensor 2 [°C]	26	ΔT	4
Sensor 3 [°C]	29	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	31.25	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	30.25	Re	20554.92
Sensor 6 [°C]	28.5	F	0.02597
Sensor 7 [°C]	28	Nu	51.26108
Sensor 8 [°C]	27.25	h [W/m ² K]	4.835119
Sensor 9 [°C]	311	Q [W]	0.435161

5.3.1.5. Prueba 5: Voltaje medio (60V) – Flujo medio (19m/s)

Para la prueba 5 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1”, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 36.

Tabla 36
Resultados prueba 5 con turbulador de espigas.

Voltaje [V]	60	T [°C]	300.875
Flujo In [m/s]	19	Pr	0.707808
Flujo Out [m/s]	3.07	k [W/mK]	0.026306
Sensor 1 [°C]	26.5	γ [m ² /s]	1.58E-05
Sensor 2 [°C]	25.75	ΔT	3.25
Sensor 3 [°C]	28.25	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	29.5	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	29.25	Re	29203.05
Sensor 6 [°C]	27.25	F	0.023794
Sensor 7 [°C]	27.5	Nu	66.28653
Sensor 8 [°C]	26.25	h [W/m ² K]	6.227697
Sensor 9 [°C]	300	Q [W]	0.4554

5.3.1.6. Prueba 6: Voltaje medio (60V) – Flujo máximo (23m/s)

Para la prueba 6 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1”, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 37.

Tabla 37
Resultados prueba 6 con turbulador de espigas.

Voltaje [V]	60	T [°C]	301.375
Flujo In [m/s]	23	Pr	0.707698
Flujo Out [m/s]	3.7	k [W/mK]	0.026344
Sensor 1 [°C]	27	γ [m ² /s]	1.58E-05
Sensor 2 [°C]	26.75	ΔT	2.25
Sensor 3 [°C]	28.75	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	29.5	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	29.5	Re	35082.84
Sensor 6 [°C]	28.25	F	0.022765
Sensor 7 [°C]	27.5	Nu	75.92607
Sensor 8 [°C]	27.25	h [W/m ² K]	7.143619

CONTINÚA

Sensor 9 [°C]	262.75	Q [W]	0.361646
---------------	--------	-------	----------

5.3.1.7. Prueba 7: Voltaje mínimo (40V) – Flujo mínimo (15m/s)

Para la prueba 7 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1”, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 38.

Tabla 38

Resultados prueba 7 con turbulador de espigas.

Voltaje [V]	40	T [°C]	301.25
Flujo In [m/s]	15	Pr	0.707725
Flujo Out [m/s]	2.35	k [W/mK]	0.026335
Sensor 1 [°C]	26.5	γ [m ² /s]	1.58E-05
Sensor 2 [°C]	26	ΔT	2.5
Sensor 3 [°C]	28.5	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	29.5	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	29.25	Re	22300.25
Sensor 6 [°C]	27.5	F	0.025439
Sensor 7 [°C]	27.5	Nu	54.39694
Sensor 8 [°C]	27	h [W/m ² K]	5.116178
Sensor 9 [°C]	230.25	Q [W]	0.287785

5.3.1.8. Prueba 8: Voltaje mínimo (40V) – Flujo medio (19m/s)

Para la prueba 8 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1”, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 39.

Tabla 39

Resultados prueba 8 con turbulador de espigas.

Voltaje [V]	40	T [°C]	301.125
Flujo In [m/s]	19	Pr	0.707753
Flujo Out [m/s]	3.02	k [W/mK]	0.026325

CONTINÚA

Sensor 1 [°C]	27	γ [m ² /s]	1.58E-05
Sensor 2 [°C]	26.75	ΔT	2.75
Sensor 3 [°C]	29	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	29.5	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	29.5	Re	28681.23
Sensor 6 [°C]	28	F	0.023899
Sensor 7 [°C]	27.5	Nu	65.40818
Sensor 8 [°C]	26.75	h [W/m ² K]	6.149601
Sensor 9 [°C]	214.5	Q [W]	0.380507

5.3.1.9. Prueba 9: Voltaje mínimo (40V) – Flujo máximo (23m/s)

Para la prueba 6 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1”, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 40.

Tabla 40

Resultados prueba 9 con turbulador de espigas.

Voltaje [V]	40	T [°C]	301.625
Flujo In [m/s]	23	Pr	0.707643
Flujo Out [m/s]	3.7	k [W/mK]	0.026363
Sensor 1 [°C]	28.25	γ [m ² /s]	1.58E-05
Sensor 2 [°C]	28.5	ΔT	2.25
Sensor 3 [°C]	30.25	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	30.5	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	30.75	Re	35215.93
Sensor 6 [°C]	29.25	F	0.022745
Sensor 7 [°C]	28.75	Nu	76.13657
Sensor 8 [°C]	28	h [W/m ² K]	7.168578
Sensor 9 [°C]	203.5	Q [W]	0.362909

5.3.2. Turbulador de aletas

Para el turbulador de aletas se realizará tres pruebas en los cuales están involucrados los valores máximos y mínimos de flujo y temperatura. La temperatura está controlada por el voltaje ingresado en el HMI del equipo.

5.3.2.1. Prueba 1: Voltaje máximo (80V) – Flujo mínimo (15m/s)

Para la prueba 1 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1” en el turbulador de espigas, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 41.

Tabla 41

Resultados prueba 1 con turbulador de aletas.

Voltaje [V]	80	T [°C]	301.875
Flujo In [m/s]	15	Pr	0.707588
Flujo Out [m/s]	2.11	k [W/mK]	0.026382
Sensor 1 [°C]	26.5	γ [m ² /s]	1.59E-05
Sensor 2 [°C]	27.75	ΔT	1.75
Sensor 3 [°C]	29	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	29.75	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	29.5	Re	19942.66
Sensor 6 [°C]	29.25	F	0.026171
Sensor 7 [°C]	28.5	Nu	50.15412
Sensor 8 [°C]	28	h [W/m ² K]	4.725615
Sensor 9 [°C]	413	Q [W]	0.186071

5.3.2.2. Prueba 2: Voltaje máximo (80V) – Flujo medio (19m/s)

Para la prueba 2 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1” en el turbulador de espigas, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 42.

Tabla 42*Resultados prueba 2 con turbulador de aletas.*

Voltaje [V]	80	T [°C]	301.75
Flujo In [m/s]	19	Pr	0.707615
Flujo Out [m/s]	3.05	k [W/mK]	0.026373
Sensor 1 [°C]	27.25	γ [m ² /s]	1.59E-05
Sensor 2 [°C]	28.25	ΔT	1.5
Sensor 3 [°C]	29.25	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	29.5	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	30	Re	28850.16
Sensor 6 [°C]	29.25	F	0.023865
Sensor 7 [°C]	28.75	Nu	65.68417
Sensor 8 [°C]	28	h [W/m ² K]	6.186663
Sensor 9 [°C]	392.25	Q [W]	0.2088

5.3.2.3. Prueba 3: Voltaje máximo (80V) – Flujo máximo (23m/s)

Para la prueba 3 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1” en el turbulador de espigas, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 43.

Tabla 43*Resultados prueba 3 con turbulador de aletas.*

Voltaje [V]	80	T [°C]	302
Flujo In [m/s]	23	Pr	0.70756
Flujo Out [m/s]	3.8	k [W/mK]	0.026392
Sensor 1 [°C]	27.75	γ [m ² /s]	1.59E-05
Sensor 2 [°C]	28.25	ΔT	2
Sensor 3 [°C]	29.75	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	30	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	30.25	Re	35886.97
Sensor 6 [°C]	29	F	0.022643
Sensor 7 [°C]	28.25	Nu	77.20806

CONTINÚA

Sensor 8 [°C]	28	h [W/m ² K]	7.2773
Sensor 9 [°C]	400.5	Q [W]	0.327479

5.3.3. Turbulador de cara plana

Para el turbulador de cara plana se realizará tres pruebas en las cuales están involucrados los valores máximos y mínimos de flujo y temperatura. La temperatura está controlada por el voltaje ingresado en el HMI del equipo.

5.3.3.1. Prueba 1: Voltaje máximo (80V) – Flujo mínimo (15m/s)

Para la prueba 1 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1” en el turbulador de espigas, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 44.

Tabla 44

Resultados prueba 1 con turbulador de cara plana.

Voltaje [V]	80	T [°C]	301.125
Flujo In [m/s]	15	Pr	0.707753
Flujo Out [m/s]	2.16	k [W/mK]	0.026325
Sensor 1 [°C]	27	γ [m ² /s]	1.58E-05
Sensor 2 [°C]	27.5	ΔT	0.75
Sensor 3 [°C]	29	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	28.5	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	28.5	Re	20513.73
Sensor 6 [°C]	28.75	F	0.025983
Sensor 7 [°C]	28.25	Nu	51.19707
Sensor 8 [°C]	27.75	h [W/m ² K]	4.813489
Sensor 9 [°C]	467.75	Q [W]	0.081228

5.3.3.2. Prueba 2: Voltaje máximo (80V) – Flujo medio (19m/s)

Para la prueba 2 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1” en el turbulador de espigas, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 45.

Tabla 45

Resultados prueba 2 con turbulador de cara plana.

Voltaje [V]	80	T [°C]	301.375
Flujo In [m/s]	19	Pr	0.707698
Flujo Out [m/s]	3.2	k [W/mK]	0.026344
Sensor 1 [°C]	27.5	γ [m ² /s]	1.58E-05
Sensor 2 [°C]	27.75	ΔT	0.75
Sensor 3 [°C]	29	Dh [m]	0.15
Sensor 4 [°C]	28.75	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	28.5	Re	30341.92
Sensor 6 [°C]	28.75	F	0.023574
Sensor 7 [°C]	28.25	Un	68.17883
Sensor 8 [°C]	28	h [W/m ² K]	6.414709
Sensor 9 [°C]	440.5	Q [W]	0.108248

5.3.3.3. Prueba 3: Voltaje máximo (80V) – Flujo máximo (23m/s)

Para la prueba 3 se realizó el mismo procedimiento de la “Prueba 1” en el turbulador de espigas, y se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 46.

Tabla 46

Resultados prueba 3 con turbulador de cara plana.

Voltaje [V]	80	T [°C]	300.875
Flujo In [m/s]	23	Pr	0.707808
Flujo Out [m/s]	3.63	k [W/mK]	0.026306
Sensor 1 [°C]	27.25	γ [m ² /s]	1.58E-05
Sensor 2 [°C]	27	ΔT	0.75
Sensor 3 [°C]	28.25	Dh [m]	0.15

CONTINÚA

Sensor 4 [°C]	28.25	Lc [m]	0.28
Sensor 5 [°C]	28.25	Re	34529.99
Sensor 6 [°C]	28	F	0.022852
Sensor 7 [°C]	27.75	Nu	75.04186
Sensor 8 [°C]	27.5	h [W/m ² K]	7.05027
Sensor 9 [°C]	439.25	Q [W]	0.118973

5.4. Validación de resultados

Para la validación de resultados se tomará en cuenta los valores de configuración de equipo ingresados en cada prueba tomada y se comparará con el valor real que el equipo nos entrega, para así calcular un error en cada una de las pruebas realizadas como se indica en la siguiente Tabla 47.

Tabla 47
Validación de ingresados y obtenidos.

Turbulador	# Prueba		Valor Ingresado	Valor Real	Error [%]
Espigas	Prueba 1	Voltaje [V]	80	78	2.5
		Flujo[m/s]	15	15.22	1.47
	Prueba 2	Voltaje [V]	80	78	2.5
		Flujo[m/s]	19	19.18	0.95
	Prueba 3	Voltaje [V]	80	79	1.25
		Flujo[m/s]	23	23.16	0.70
	Prueba 4	Voltaje [V]	60	61	1.66
		Flujo[m/s]	15	14.94	0.40
	Prueba 5	Voltaje [V]	60	61	1.66
		Flujo[m/s]	19	19.15	0.79

CONTINÚA

	Prueba 6	Voltaje [V]	60	61	1.66
		Flujo[m/s]	23	23.14	0.61
	Prueba 7	Voltaje [V]	40	42	5
		Flujo[m/s]	15	15.35	2.33
	Prueba 8	Voltaje [V]	40	42	5
		Flujo[m/s]	19	18.95	0.26
	Prueba 9	Voltaje [V]	40	42	5
		Flujo[m/s]	23	23.16	0.70
	Aletas	Prueba 1	Voltaje [V]	80	78
Flujo[m/s]			15	15.26	1.73
Prueba 2		Voltaje [V]	80	79	1.25
		Flujo[m/s]	19	19.11	0.59
Prueba 3		Voltaje [V]	80	78	2.5
		Flujo[m/s]	23	23.13	0.56
Cara Plana	Prueba 1	Voltaje [V]	80	79	1.25
		Flujo[m/s]	15	14.98	0.13
	Prueba 2	Voltaje [V]	80	78	2.5
		Flujo[m/s]	19	19.08	0.42
	Prueba 3	Voltaje [V]	80	78	2.5
		Flujo[m/s]	23	23.14	0.61

Comparando los resultados obtenidos en las pruebas en los tres diferentes turbuladores, bajo las mismas condiciones como se observa en la Tabla 48.

Tabla 48
Comparación de resultados.

Condiciones		Cantidad de calor Q[W]		
Voltaje caja térmica[V]	Velocidad de entrada de aire[m/s]	Espigas	Aletas	Cara plana
80	15	0.4753	0.1860	0.0812
	19	0.4954	0.2088	0.1082
	23	0.4484	0.3274	0.1189

Por esta razón determinamos que el turbulador de espigas es el mejor método para transferir calor, ya que presenta un mayor Q en relación a los otros dos turbuladores.

5.5. Análisis económico y financiero

Al plantear el perfil de tesis, se presentó un presupuesto estimado, aunque en el desarrollo del proyecto, se observaron gastos y costos reales de los materiales y elementos, los cuales se pueden observar a continuación.

5.5.1. Materiales

En la siguiente Tabla 49, se muestra el costo de los materiales utilizados en el proyecto.

Tabla 49
Costo de materiales.

Item	Detalle	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Plancha de acero inoxidable 1.22x2.44 m2 1mm	1	61.03	61.03
2	Tubo estructural cuadrado 1 pulg 2mm	3	8.00	24.00
3	Plancha de tol 1.22x1.22 m2	1	5.00	5.00
4	Plancha de aluminio 1.22 x 0.30 m2 3mm	1	14.50	14.50
5	Eje de aluminio ½ pulg 15.5cm	18	1.48	26.61
6	Perno / Hierro M8	20	0.15	3.00
7	Tuerca / Hierro M8	20	0.035	0.70
8	Arandela / hierro galvanizado	20	0.05	1.00
9	Tornillo	9	0.10	0.90
10	Esparrago acero inoxidable M6	4	0.25	1.00

CONTINÚA

11	Tuerca acero inoxidable M6	4	0.035	0.14
12	Perno/ Hierro Hexagonal galvanizado M8	8	0.22	1.76
13	Tuerca hierro galvanizado M8	8	0.035	0.14
14	Placa de acero	1	4.00	4.00
15	Empaque de corcho	1	5.00	5.00
16	Empaque de alta temperatura	1	7.00	7.00
TOTAL				155.78

5.5.2. Elementos y accesorios

En la siguiente Tabla 50, se muestra el costo de los elementos y accesorios utilizados en el proyecto.

Tabla 50
Costo de elementos y accesorios.

Item	Detalle	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
1	Enchufe 110V	2	0.75	1.50
2	Enchufe 220V	2	0.75	1.50
3	Tomacorriente 110V	1	1.75	1.75
4	Tomacorriente 220V	1	1.75	1.75
5	Porta fusible x1	2	3.00	6.00
6	Fusible	2	1.00	2.00
7	Módulo relé x4	1	8.00	8.00
8	Switch de 2 estados	2	2.50	5.00
9	Luz piloto	4	3.00	12.00
10	Controlador AT Mega 2560	1	23.00	23.00
11	Fuente DC	1	35.00	35.00
12	Ventilador 12 V	1	5.00	5.00

CONTINÚA

13	Servo motor	1	3.00	3.00
14	Dimmer 400 W	1	7.50	7.50
15	Módulo PCB de control de niquelina	1	10.55	10.55
16	Niquelina 550 W	1	62.00	62.00
17	Soplador AC 110V	1	47.11	47.11
18	Módulo PCB de adquisición de datos de sensores	1	20.00	20.00
19	Termopar tipo K tipo tornillo	9	9.48	85.32
20	Borneras plásticas	2	0.50	1.00
21	Computador	1	400.00	400.00
22	Anemómetro	1	50.00	50.00
23	Cable 220V	3m	1.50	4.50
24	Cable 110V	2m	0.75	1.50
25	Cable jumper	42	0.10	4.20
26	Cable #16 AWG gemelo flexible R/N	10 m	0.75	7.50
27	Caja 30cmx30cmx15cm	1	27.45	27.45
TOTAL				834.13

5.5.3. Costo de fabricación

En la siguiente Tabla 51, se muestra el costo de uso de cada máquina herramienta utilizada en el proyecto.

Tabla 51
Costo de uso de máquinas herramientas .

Item	Detalle	Total Horas	Costo x Hora	Costo Total
1	Guillotina	19	5.00	95.00
2	Taladro de pedestal	6	8.00	48.00
3	Dobladora	10	3.00	30.00
4	Soldadora TIG	6.5	30.00	195.0
5	Soldadora de punto	0.5	10.00	5.00
6	Soldadora por arco	3	15.00	45.00
7	Amoladora	11	10.00	110.00

CONTINÚA

8	Fresadora	8	20.00	160.00
9	Torno	10	20.00	200.00
10	Taladro de mano	2	3.00	6.00
TOTAL				894.00

6. CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Se realizó el diseño y la construcción de un equipo automatizado de convección forzada con diferentes turbuladores para el laboratorio de conversión de energías de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, lo que permitirá a los estudiantes, comprobar de forma experimental lo aprendido en forma teórica.

Para la realización del diseño mecatrónico del equipo en general fue necesario realizar una matriz QFD, la cual nos ayudó para una mejor selección de materiales a utilizar en la construcción mecánica, en la adquisición de equipos eléctricos y electrónicos como también la optimización del HMI.

Se realizaron dos placas PCB, siendo una de control donde se hace el acondicionamiento de las señales de las termocuplas como también el envío de los datos hacia el controlador, separándola así de la placa de potencia a la cual el controlador envía señal modulada la cual gobierna al actuador.

El HMI realizado permite configurar datos iniciales como son: el voltaje para la niquelina, la velocidad del aire de entrada y el tipo de turbulador, además nos permite tener un monitoreo en tiempo real de la variación de la temperatura a lo largo del ducto como también dentro de la caja térmica; conjuntamente proporciona los datos obtenidos para un posterior análisis.

El diseño total del equipo nos permite trabajar con un flujo turbulento, ya que el número de Reynolds en las pruebas realizadas fueron mayores a 4000, así como el Prandtl que se obtiene es mayor a 0.7, estas condiciones nos permiten utilizar la correlación de Petukhov para el cálculo de Nusselt.

El HMI permite al usuario al finalizar la practicar exportar los datos obtenidos en dos hojas de cálculos, de las cuales, una tiene acceso el estudiante y la otra será compartida al ordenador del laboratorista mediante la red de compartición de datos implementada.

Con las pruebas realizadas se pudo determinar que el turbulador de espigas es el que mejor conduce el calor, en relación a los turbuladores de aletas y cara plana. Además, la mayor cantidad de calor disipado en las pruebas realizadas se dio bajo la condición de la velocidad de aire $v=19$ [m/s], en comparación a la velocidad máxima $v=23$ [m/s] y velocidad mínima $v=15$ [m/s].

Con relación al turbulador de aletas, el calor disipado es mayor cuando las condiciones de velocidad son mayores $v=23$ [m/s], por tal motivo se puede decir que, a mayor velocidad de aire, mayor Q obtenido, bajo la condición de un voltaje constante.

Con relación al turbulador de cara plana, el calor disipado es mayor cuando las condiciones de velocidad son mayores $v=23$ [m/s], por tal motivo se puede decir que, a mayor velocidad de aire, mayor Q obtenido, bajo la condición de un voltaje constante.

6.2. Recomendaciones

Para trabajos futuros, es recomendable turbuladores de diferentes formas y materiales, permitiendo así realizar varios estudios de transferencia de calor por convección,

Se recomienda ampliar rangos de temperatura en la caja térmica y de velocidad de entrada, para aumentar la cantidad de pruebas posibles a realizar en el equipo, como sería el caso de tener flujo laminar.

Mejorar el aislamiento de la caja térmica, para evitar el calentamiento del exterior de esta.

Implementar nuevas cajas térmicas para cada turbulador, y así reducir el tiempo de enfriamiento, para poder empezar otra práctica.

7. CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

- Armfield. (20 de Noviembre de 2017). *Armfield*. Obtenido de <http://discoverarmfield.com/es/products/view/ht19/intercambiador-de-calor-por-conveccion-libre-y-forzada>
- Bocanegra, H. (2012). *Flujogramas y floxogramas*. Bogota: Fundación SIIGO.
- Bolton, W. (2006). *Ingeniería de control*. México: Alfaomega.
- Cengel, Y. (2011). Termodinámica. En Y. Cengel, *Termodinámica* (pág. 1008). México: Mc Graw Hill.
- Cheréque, W. (1987). *Mecánica de fluidos I*. Lima: Pontifica Universidad Católica Del Perú.
- DIKOIN INGENIERÍA S.L. (20 de Noviembre de 2017). Obtenido de <http://dikoin.com/it-03-2-transmision-de-calor-por-conveccion-natural-y-forzada/>
- Edibon INTERNATIONAL. (Marzo de 2014). Obtenido de <http://www.edibon.com/es/files/equipment/TCLFC/catalog>
- Electrónicos, A. P. (20 de 02 de 2018). *ABC Proyectos Electrónicos*. Obtenido de <https://www.abcelectronica.net/productos/interruptores/>
- Generatoris. (30 de Noviembre de 2017). *Generatoris S.A. de C.V.* Obtenido de <http://www.generatoris.com/home/subcategoria/46>
- Gonzáles, F. (2010). *Introducción a la mecánica de fluidos*. Táchira: Universidad Nacional Experimental del Táchira.
- Gunt Hamburg. (20 de Noviembre de 2017). Obtenido de <http://www.gunt.de/es/productos/ingenieria-termica/fundamentos-de-termodinamica/principios-de-la-transferencia-de-calor/conveccion-libre-y-forzada/060.44000/wl440/glct-1:pa-150:ca-91:pr-1522?sccsf=1>
- Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Mexico: Prentice Hall.
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Mexico: Prentice Hall.
- Instruments, N. (22 de 01 de 2018). *Guía de acondicionamiento de señales para ingenieros*. Obtenido de ftp://ftp.ni.com/evaluation/signal_conditioning/23807_Engineer_s_guide_to_signal_conditioning_Spanish_localisation_HR.pdf
- Karlekar.B. (1995). *Transferencia de calor*. México: McGRAW-HILL.
- Landay, & Lifshitz. (1994). *Mecánica*. Barcelona: Reverté.
- Larco, J. (2014). *Diseño y construcción de un equipo didáctico de convección forzada con sistema de control centralizado para el laboratorio de transferencia de calor*. Quito.
- Levenspiel, O. (1993). *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. Mexico: Reverté.
- NERGIZA. (27 de Junio de 2013). *Radiación, conducción y convección: tres formas de transferencia de calor*. Obtenido de <https://nergiza.com/radiacion-conduccion-y-conveccion-tres-formas-de-transferencia-de-calor/>
- Nieves, A. (18 de 01 de 2018). *Apoyo Educativo Virtual*. Obtenido de http://www.aev.cgfi.ipn.mx/Materia_quimica/temas/tema1/subtema4/subtema4.html
- Ordorica, M. (2006). *Termodinámica*. Mexico: Instituto Poltecnico Nacional.
- Peña, B. d. (2009). *Elementos de electrónica*. Cuatitlán: Universidad nacional autonoma de Mexico.

- Sanvalero, F. (25 de 02 de 2018). *Circuitos eléctricos, leyes y teoremas*. Obtenido de <https://profejoseantonio.wikispaces.com/file/view/Circuitos+electricos+Leyes+y+Teoremas.pdf>
- White, F. (2004). *Mecánica de fluidos*. Madrid: Mc Graw Hill.
- WURTH. (20 de 02 de 2018). *WURTH*. Obtenido de <https://www.wurth.es/electricidad/pilas>