



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DIDÁCTICO DE
INSTRUMENTACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS
TERMOPARES TIPO J, K & T, Y CONTROL DE UN HORNO DE
TRES ETAPAS”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES:

GUSTAVO ISRAEL GUERRERO QUEZADA

PAÚL ANDRÉS ARIAS POZO

Riobamba – Ecuador

2021



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DIDÁCTICO DE
INSTRUMENTACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS
TERMOPARES TIPO J, K & T, Y CONTROL DE UN HORNO DE
TRES ETAPAS”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: GUSTAVO ISRAEL GUERRERO QUEZADA

PAÚL ANDRÉS ARIAS POZO

DIRECTOR: Ing. Carlos Serrano

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Gustavo Israel Guerrero Quezada; & Paúl Andrés Arias Pozo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por medio de cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Gustavo Israel Guerrero Quezada y Paúl Andrés Arias Pozo, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 20 de marzo de 2021.

Handwritten signature of Gustavo Israel Guerrero Quezada, featuring the letters 'GIAQ' in a stylized, blocky font.

Gustavo Israel Guerrero Quezada
180443505-3

Handwritten signature of Paúl Andrés Arias Pozo, featuring the letters 'PAAP' in a stylized, cursive font.

Paúl Andrés Arias Pozo.
180442342-2

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DIDÁCTICO DE INSTRUMENTACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS TERMOPARES TIPO J, K & T, Y CONTROL DE UN HORNO DE TRES ETAPAS**, realizado por los señores: **GUSTAVO ISRAEL GUERRERO QUEZADA** y **PAÚL ANDRÉS ARIAS POZO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

2021-04-01

Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

2021-04-01

Ing. Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

2021-04-01

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres Gustavo y Marilú que siempre me brindan su apoyo incondicional, sin permitir que me rinda y siga adelante, a mis hermanos Débora y Sebastián que siempre me ofrecen esa amistad sincera esperando siempre lo mejor para con nosotros, a todos mis compañeros que hicieron de este camino lo mejor.

Gustavo Guerrero

El presente trabajo esta dedicado a la memoria de mi padre Jorge, que con su vida implanto este sueño en mí, a mi madre Ruth, que siempre me mostro su amor en forma de apoyo incondicional, a mi esposa Joselyn y a mi hijo Timoteo que me inspiran todos los días a seguir creciendo como persona, a mis hermanos Homero, Diego y Christian, que constantemente me impulsaron a continuar y nunca rendirme y a todos mis amigos, que en el trayecto formaron parte de lo que ahora soy.

Paúl Arias

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a Dios que me ha permitido terminar esta etapa de mi vida, a mis padres por siempre apoyarme, a mis hermanos y cuñado que siempre me ayudan en todo momento, y a todas las personas que a lo largo de esta trayectoria me han brindado de su apoyo.

De manera en especial agradecer a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por ayudarme a conseguir mi título profesional, al Ingeniero Carlos Serrano y al Ingeniero Pablo Montalvo por acompañarnos en el proceso con sus conocimientos y experiencia.

Gustavo Guerrero

Agradezco a Dios, porque a pesar de mi infidelidad, Él siempre ha permanecido fiel. Así mismo quiero agradecer a todas las personas que Dios ha puesto en el camino para ayudarme a cumplir su promesa, a mis padres, hermanos y demás familiares que de una u otra manera supieron brindar su apoyo cuando lo necesité, a los compañeros de carrera que supieron hacerse amigos, y que me impulsaron a siempre seguir adelante.

Agradezco también, y de manera especial a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por ayudarme en el trayecto de conseguir mi título profesional, al Ingeniero Carlos Serrano y al Ingeniero Pablo Montalvo, por aportar en el proceso con sus conocimientos y virtudes.

Paúl Arias

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxii
RESUMEN.....	xxiii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Formulación del Problema.....	5
1.3. Justificación.....	5
<i>1.3.1. Justificación Práctica.....</i>	<i>5</i>
<i>1.3.2. Justificación Teórica.....</i>	<i>5</i>
<i>1.3.3. Justificación Metodológica.....</i>	<i>6</i>
1.4. Alcance.....	6
1.5. Objetivos.....	6
<i>1.5.1. Objetivo General.....</i>	<i>6</i>
<i>1.5.2. Objetivos Específicos.....</i>	<i>6</i>

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	8
2.1. Temperatura.....	8
<i>2.1.1. Medición de la Temperatura en el sector Industrial.....</i>	<i>8</i>
<i>2.1.2. Medición de Temperatura con Termopares o Termocuplas.....</i>	<i>10</i>
<i>2.1.2.1. Termopar Tipo J.....</i>	<i>13</i>

2.1.2.2.	<i>Termopar Tipo K</i>	13
2.1.2.3.	<i>Termopar tipo T</i>	14
2.1.3.	<i>Calibración de Temperatura.</i>	14
2.1.4.	<i>Equipo para calibración.</i>	15
2.1.4.1.	<i>Patrón de referencia</i>	15
2.2.	Horno	16
2.2.1.	<i>Hornos Eléctricos</i>	16
2.2.2.	<i>Hornos Eléctricos de Resistencias</i>	17
2.2.2.1.	<i>Ventajas del uso de Hornos Eléctricos de Resistencia</i>	17
2.2.3.	<i>Tipos de Resistencia</i>	18
2.2.3.1.	<i>Resistencias Blindadas</i>	18
2.2.4.	<i>Aislantes Térmicos.</i>	19
2.3.	Conceptos para el diseño estructural y térmico de elementos.	20
2.3.1.	<i>Límite de elasticidad de un material.</i>	20
2.3.2.	<i>Dilatación térmica.</i>	20
2.3.3.	<i>Primera ley de la termodinámica.</i>	20
2.3.4.	<i>Calor sensible.</i>	20
2.3.5.	<i>Transferencia de calor por radiación.</i>	20
2.3.6.	<i>Transferencia de calor por convección.</i>	21
2.3.6.1.	<i>Número de Nusselt.</i>	21
2.3.6.2.	<i>Temperatura película.</i>	21
2.3.6.3.	<i>Número de Grashof</i>	21
2.3.6.4.	<i>Número de Rayleigh</i>	21
2.3.7.	<i>Convección Natural o Libre.</i>	22
2.3.8.	<i>Transferencia de calor por conducción.</i>	22
2.4.	Sistemas microcontrolados.	22
2.5.	Microcontroladores.	23
2.5.1.	<i>Microcontrolador Arduino.</i>	23
2.5.1.1.	<i>Tipos de Arduino.</i>	23

2.5.2.	Raspberry Pi (UPS)	24
2.5.2.1.	<i>Raspberry Pi 3 MODELO B+</i>	24
2.6.	Automatización Industrial	25
2.6.1.	<i>Elementos que conforman un Sistema automatizado.</i>	25
2.7.	Sistemas de Control	26
2.7.1.	<i>Componentes básicos de los sistemas de control.</i>	26
2.7.2.	<i>Tipos de sistemas de control.</i>	27
2.7.2.1.	<i>Sistema de control a lazo abierto</i>	27
2.7.2.2.	<i>Sistema de control a lazo cerrado</i>	28
2.8.	Respuesta de un Sistema ante los distintos tipos de entradas.	28
2.9.	Sistemas de Primer Orden	29
2.9.1.	<i>Respuesta del Sistema de primer Orden ante una entrada Escalón.</i>	30
2.10.	Sistemas de Segundo Orden.	31
2.10.1.	<i>Respuesta transitoria ante una entrada escalón caso sub-amortiguado.</i>	34
2.10.1.1.	<i>Tiempo de establecimiento, T_s.</i>	35
2.10.1.2.	<i>Tiempo de pico, t_p</i>	35
2.10.1.3.	<i>Sobre-oscilación, M_p</i>	36
2.10.1.4.	<i>Tiempo de subida, t_r</i>	36
2.11.	Control PID	37
2.11.1.	<i>Componentes de un control PID</i>	37
2.11.2.	<i>Control Proporcional</i>	38
2.11.3.	<i>Acción Integral</i>	38
2.11.4.	<i>Acción Derivativa</i>	39
2.12.	Sintonización del controlador PID	39
2.13.	Programación en Python	40

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	41
3.1.	Especificaciones Técnicas del Banco Didáctico	41

3.2.	La Casa de la Calidad	41
3.2.1.	<i>Voz del usuario</i>	42
3.2.2.	<i>Voz del Ingeniero</i>	42
3.2.3.	<i>Resultados de la casa de la calidad</i>	43
3.3.	Análisis de la estructura funcional	44
3.3.1.	<i>Nivel 0</i>	44
3.3.2.	<i>Nivel 1</i>	44
3.3.3.	<i>Nivel 2</i>	45
3.4.	Módulos	46
3.4.1.	<i>Desarrollo de las diferentes alternativas para cada módulo.</i>	46
3.4.1.1.	<i>Módulo 1: El horno</i>	46
3.4.1.2.	<i>Módulo 2: Automatización y Control del banco didáctico</i>	47
3.5.	Módulo 1: El horno	47
3.5.1.	<i>Cámaras de calentamiento.</i>	47
3.5.1.1.	<i>Alternativa 1</i>	47
3.5.1.2.	<i>Alternativa 2</i>	48
3.5.1.3.	<i>Alternativa 3</i>	49
3.5.2.	<i>El tipo de resistencias eléctricas a utilizar.</i>	49
3.5.2.1.	<i>Alternativa 1</i>	49
3.5.2.2.	<i>Alternativa 2</i>	50
3.5.2.3.	<i>Alternativa 3</i>	51
3.6.	Módulo 2: Automatización y control del banco didáctico	51
3.6.1.	<i>Modelo de los termopares</i>	51
3.6.1.1.	<i>Alternativa 1</i>	51
3.6.1.2.	<i>Alternativa 2</i>	52
3.6.1.3.	<i>Alternativa 3</i>	53
3.6.2.	<i>Microprocesador adecuado para el sistema.</i>	53
3.6.2.1.	<i>Alternativa 1</i>	54
3.6.2.2.	<i>Alternativa 2</i>	54

3.6.2.3.	<i>Alternativa 3</i>	55
3.7.	Elección de las alternativas de solución de cada módulo.	56
3.7.1.	<i>Soluciones para cada módulo</i>	56
3.7.2.	<i>Valuación de los criterios de solución.</i>	57
3.8.	Diseño a detalle del banco didáctico.	60
3.9.	Selección del material.	62
3.9.1.	<i>Material Metálico ($E > 200\text{GPa}$)</i>	62
3.9.2.	<i>Ductilidad (5-20% de elongación)</i>	63
3.9.3.	<i>Alta resistencia a la corrosión en temperaturas altas</i>	63
3.9.4.	<i>Resistencia a temperaturas mayores a 500°C</i>	64
3.9.5.	<i>Soldable</i>	64
3.9.6.	<i>Precio (< 3,50 USD/kg)</i>	65
3.9.7.	<i>Buen acabado superficial.</i>	65
3.10.	Diseño térmico del horno.	66
3.10.1.	<i>Calor requerido en la etapa crítica.</i>	66
3.10.2.	<i>Cálculo de calor por pérdidas.</i>	69
3.10.3.	<i>Pérdidas por radiación.</i>	69
3.10.4.	<i>Pérdidas por convección</i>	70
3.11.	Selección del material del aislante.	75
3.11.1.	<i>Cálculo del espesor del aislante entre etapas.</i>	77
3.11.1.1.	<i>Calor de pérdidas por radiación</i>	77
3.11.1.2.	<i>Calor por pérdidas de convección</i>	78
3.11.2.	<i>Cálculo del espesor del aislante del horno al ambiente.</i>	80
3.12.	Simulación Estática de la estructura del banco en SolidWorks	84
3.13.	Selección de elementos eléctricos y electrónicos.	86
3.13.1.	<i>Elementos eléctricos.</i>	87
3.13.1.1.	<i>Relé de estado sólido.</i>	87
3.13.1.2.	<i>Contactor.</i>	87
3.13.1.3.	<i>Pulsador de emergencia.</i>	88

3.13.1.4.	<i>Luz Piloto.</i>	89
3.13.1.5.	<i>Fuente Conmutada.</i>	89
3.13.2.	<i>Elementos electrónicos.</i>	90
3.13.2.1.	<i>Raspberry PI 3 B+</i>	90
3.13.2.2.	<i>Arduino Nano.</i>	90
3.13.2.3.	<i>Módulo Acondicionador de temperatura MAX31856.</i>	91
3.14.	<i>Diseño del circuito eléctrico.</i>	92
3.14.1.	<i>Diseño de la placa de control.</i>	94
3.15.	<i>Sistema Operativo de la placa Raspberry.</i>	96
3.15.1.	<i>Instalación de NOOBS.</i>	97
3.15.2.	<i>Librerías de Python.</i>	98
3.15.2.1.	<i>Instalación Qtdesigner.</i>	99
3.15.2.2.	<i>Instalación Pyserial.</i>	100
3.16.	<i>Librerías de Arduino</i>	100
3.17.	<i>Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario.</i>	101
3.17.1.	<i>Pantalla de configuración.</i>	102
3.17.2.	<i>Pantalla Toma de Datos.</i>	103
3.17.3.	<i>Programación grafica del sistema.</i>	104
3.17.4.	<i>Programación grafica del Microcontrolador.</i>	106
3.18.	<i>Construcción y Montaje del banco.</i>	108
3.18.1.	<i>Método de construcción.</i>	108
3.18.1.1.	<i>Construcción de los componentes del banco.</i>	108
3.18.1.2.	<i>Operaciones y tiempos de construcción para la estructura de soporte.</i>	109
3.18.1.3.	<i>Operaciones y tiempos de construcción para el horno de 3 etapas.</i>	110
3.18.1.4.	<i>Operaciones y tiempo del armado del tablero de control.</i>	111
3.18.2.	<i>Montaje del banco didáctico.</i>	111
3.18.2.1.	<i>Diagrama de flujo del montaje del banco didáctico.</i>	112
3.18.3.	<i>Tiempo total de construcción y montaje del banco didáctico.</i>	112
3.19.	<i>Operación y funcionamiento del banco didáctico.</i>	113

3.19.1.	<i>Manual de operación del banco.</i>	113
3.19.1.1.	<i>Instrucciones de funcionamiento del banco.</i>	113
3.19.2.	<i>Manual de mantenimiento del banco didáctico.</i>	116
3.20.	Análisis de costos del banco didáctico.	117
3.20.1.	<i>Costos directos.</i>	117
3.20.2.	<i>Costos indirectos.</i>	119
3.20.3.	<i>Costo final del banco didáctico.</i>	119

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS	120
4.1.	Pruebas de funcionamiento.	120
4.1.1.	<i>Pruebas preliminares del banco didáctico.</i>	120
4.1.2.	<i>Prueba de funcionamiento del banco didáctico de instrumentación.</i>	121
4.1.2.1.	<i>Calibración de termopares.</i>	125
4.1.2.2.	<i>Control automático de un horno de 3 etapas.</i>	134
4.2.	Guías de Ensayo	142
4.2.1.	<i>Guía de ensayo de calibración de termocuplas.</i>	142
4.2.2.	<i>Guía de ensayo de control PID del horno</i>	148
	CONCLUSIONES	156
	RECOMENDACIONES	157

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2. Tipos de Termopares y código de colores.	12
Tabla 2-2. Conductividad y resistencia a compresión de los materiales aislantes.	19
Tabla 1-3. Tabla de formulación de soluciones.	56
Tabla 2-3. Soluciones para el diseño conceptual del banco didáctico.	57
Tabla 3-3. Valoración de cada criterio con los criterios restantes.....	57
Tabla 4-3. Evaluación de las alternativas de solución para cada criterio.	58
Tabla 5-3. Evaluación de las soluciones en relación al criterio Interfaz simple e intuitiva.	58
Tabla 6-3. Evaluación de las soluciones en relación al criterio Automatización eficaz.	59
Tabla 7-3. Evaluación de las soluciones en relación al criterio Costo.	59
Tabla 8-3. Evaluación de las soluciones en relación al criterio Panel de control.....	59
Tabla 9-3. Matriz de solución final del banco didáctico.	59
Tabla 10-3. Propiedades del Acero AISI 304.	66
Tabla 11-3. Propiedades iniciales para calcular la masa de aire en el interior de la etapa.	68
Tabla 12-3. Propiedades del aire para calcular el calor requerido en el interior de la cámara. ..	68
Tabla 13-3. Propiedades del cuarzo y el acero para los cálculos de la radiación.	70
Tabla 14-3. Propiedades del aire para calcular el calor por convección entre cilindros concéntricos.	71
Tabla 15-3. Especificaciones de las resistencias térmicas de cuarzo.	73
Tabla 16-3. Propiedades de la tubería de Acero AISI 304.	74
Tabla 17-3. Requerimientos y rangos para la selección del material del aislante.	75
Tabla 18-3. Parámetros de la superficie de acero AISI 304.	78
Tabla 19-3. Parámetros del aire a temperatura de 39.5°C.	78
Tabla 20-3. Especificaciones del rollo de polietileno con aluminio.	80
Tabla 21-3. Propiedades del Acero AISI 304.	81
Tabla 22-3. Propiedades del aire a temperatura de 29.5°C.....	82
Tabla 23-3. Parámetros para la simulación estática	84
Tabla 24-3. Especificaciones del relé de estado sólido.	87

Tabla 25-3. Especificaciones del contactor del equipo.	88
Tabla 26-3. Especificaciones del pulsador de emergencia.	88
Tabla 27-3. Especificaciones de luz led del equipo.	89
Tabla 28-3. Especificaciones de la Raspberry Pi 3 B+.	90
Tabla 29-3. Especificaciones del microcontrolador Arduino Nano.	91
Tabla 30-3. Especificaciones del módulo acondicionador de temperatura MAX 31856.	92
Tabla 31-3. Componentes incluidos en la placa de control.	94
Tabla 32-3. Máquinas usadas en la fabricación del banco.	108
Tabla 33-3. Herramientas utilizadas en la fabricación.	108
Tabla 34-3. Materiales de los componentes del banco didáctico.	108
Tabla 35-3. Operaciones y tiempos para la construcción de la estructura del soporte.	109
Tabla 36-3. Operaciones y tiempos de construcción del horno de 3 etapas.	110
Tabla 37-3. Operaciones y tiempos del armado del tablero.	111
Tabla 38-3. Montaje del banco didáctico.	112
Tabla 39-3. Tiempo total de construcción y montaje del banco didáctico.	112
Tabla 40-3. Especificaciones técnicas del banco didáctico.	113
Tabla 41-3. Instrucciones de funcionamiento del equipo.	114
Tabla 42-3. Relación de temperatura patrón y voltaje medido de termopar a prueba.	115
Tabla 43-3. Cálculo de la temperatura con el voltaje medido y control PID del horno.	116
Tabla 44-3. Mantenimiento preventivo del banco didáctico.	116
Tabla 45-3. Costo de la parte mecánica para la construcción del equipo.	117
Tabla 46-3. Costo de los materiales eléctricos y electrónicos para el control del equipo.	117
Tabla 47-3. Costo de desarrollo de la placa electrónica del equipo.	118
Tabla 48-3. Costo de la mano de obra.	118
Tabla 49-3. Costo del uso de equipos y herramientas.	118
Tabla 50-3. Total, de los costos directos del equipo.	118
Tabla 51-3. Costos indirectos del banco didáctico.	119
Tabla 52-3. Costo final del bando didáctico.	119
Tabla 1-4. Pruebas de funcionamiento antes de la práctica.	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Tipos de dispositivos más comunes para la medición de la Temperatura.....	10
Figura 2-2. Esquema de uniones en una Termocupla.	11
Figura 3-2. Clasificación de patrones de medición.	15
Figura 4-2. Resistencia Blindada con sus partes. 1) Blindada. 2) Forro Metálico. 3) Óxido de magnesio. 4) Bobina Níquel – Cromo.....	18
Figura 5-2. Convección Natural.....	22
Figura 6-2. Diagrama de un sistema microcontrolado.	22
Figura 7-2. Esquema de un sistema automatizado	25
Figura 8-2. Esquema de un sistema de control	26
Figura 9-2. Sistema de control de lazo abierto.....	27
Figura 10-2. Sistema de control de lazo cerrado.....	28
Figura 11-2. Esquema del comportamiento del Sistema.....	28
Figura 12-2. Tipos de entradas a los sistemas.....	29
Figura 13-2. Sistema de primer Orden.....	29
Figura 14-2. Respuesta al escalón unitario primer orden.....	31
Figura 15-2. Sistema de segundo orden.	31
Figura 16-2. Parámetros que caracterizan el sistema y la ubicación de los polos.....	32
Figura 17-2. Sistemas de segundo orden con sus distintas variaciones de ζ	34
Figura 18-2. Respuesta de un sistema sub-amortiguado a una entrada escalón unitario.	35
Figura 19-2. Esquema de un control PID.....	37
Figura 20-2. Software Python 3.9	40
Figura 1-3. Casa de la calidad (<i>House of Quality</i>)	43
Figura 2-3. Diagrama de la función principal del banco didáctico.	44
Figura 3-3. Diseño conceptual nivel 1.	45
Figura 4-3. Diseño conceptual nivel 2.	45
Figura 5-3. Módulos del banco didáctico de calibración.	46
Figura 6-3. Primer diseño para el modelo del horno.....	48

Figura 7-3. Segundo diseño para el modelo del horno.....	48
Figura 8-3. Tercer diseño para el modelo del horno.	49
Figura 9-3. Resistencia eléctrica metálica.....	50
Figura 10-3. Electrodo de Grafito.	50
Figura 11-3. Resistencia de cuarzo.	51
Figura 12-3. Termocupla modelo bayoneta.	52
Figura 13-3. Termocupla con racor de conexión.	53
Figura 14-3. Termocupla modelo punzón.....	53
Figura 15-3. Microprocesador Arduino.	54
Figura 16-3. Microprocesador Raspberry Pi B+.	55
Figura 17-3. PLC Simatic S7-1500.....	55
Figura 18-3. Armazón del horno.....	60
Figura 19-3. Dimensiones del armazón del horno.	61
Figura 20-3. Modelado del prototipo del banco didáctico.	61
Figura 21-3. Materiales metálicos con un módulo de elasticidad mayor a 200GPa.	62
Figura 22-3. Materiales metálicos con elongación del 5 al 20%.	63
Figura 23-3. Materiales metálicos resistentes a la corrosión a temperatura de 500°C.	63
Figura 24-3. Materiales metálicos resistentes a la corrosión a temperatura de 500°C.	64
Figura 25-3. Materiales metálicos resistentes a la corrosión a temperatura de 500°C.	64
Figura 26-3. Materiales metálicos con precio menor a 3,50 USD/kg.	65
Figura 27-3. Materiales metálicos con pulido y bruñido.	65
Figura 28-3. Análisis de energía entre la resistencia y la cámara.	67
Figura 29-3. Diseño de las etapas del horno.	74
Figura 30-3. Dimensiones de las etapas del horno.....	74
Figura 31-3. Aislantes con un coeficiente de conductividad menor a 0,04 $W/m \cdot ^\circ C$	75
Figura 32-3. Aislantes con temperaturas de servicio de 100°C.....	76
Figura 33-3. Aislantes con precio menor a 9 USD/kg.	76
Figura 34-3. Relación Conductividad térmica vs Precio.	77
Figura 35-3. Análisis de energía en la cara exterior del aislante.....	81

Figura 36-3. Análisis de esfuerzos del soporte del banco con las cargas del tablero y el horno.	85
Figura 37-3. Tablero de control.	86
Figura 38-3. Distribución de los dispositivos en el tablero de control.....	86
Figura 39-3. Fuente conmutada.	89
Figura 40-3. Circuito eléctrico del banco didáctico de instrumentación.....	93
Figura 41-3. Esquema de la placa de control.	95
Figura 42-3. Placa PCB.....	95
Figura 43-3. Placa de control final.....	96
Figura 44-3. Herramienta NOOBS	96
Figura 45-3. SD Card Formatter	97
Figura 46-3. NOOBS ejecutándose en el Raspberry Pi	98
Figura 47-3. Pantalla de inicio de RASBPERRY PI OS.	98
Figura 48-3. Instalación Qt en el CMD.....	99
Figura 49-3. Pantalla Qt Designer.....	100
Figura 50-3. IDE de Arduino.	101
Figura 51-3. Librería del modulo MAX31856.....	101
Figura 52-3. Pantalla menú principal.....	102
Figura 53-3. Pantalla de Configuración.	103
Figura 54-3. Pantalla Toma de Datos.....	104
Figura 55-3. Diagrama de Flujo del Sistema de control.	105
Figura 56-3. Diagrama de Flujo del Microcontrolador.	107
Figura 57-3. Diagrama de flujo del montaje del banco didáctico.	112
Figura 1-4. Software Advanced IP Scanner.....	121
Figura 2-4. Ingreso de la dirección IP en el software VNC Viewer.	122
Figura 3-4. Usuario y contraseña para VNC.....	122
Figura 4-4. Ventana principal de la Raspberry.	123
Figura 5-4. Selección de la carpeta código_python2.	123
Figura 6-4. Selección del archivo guideHorno.py	124

Figura 7-4. Ejecutar programa.	124
Figura 8-4. Interfaz del banco didáctico de instrumentación.	125
Figura 9-4. Requerimientos iniciales para la calibración de termopares.	126
Figura 10-4. Temperatura de trabajo en la etapa 1.	126
Figura 11-4. Horno encendido al iniciar la práctica.	127
Figura 12-4. Datos y gráfica de la etapa utilizada.	127
Figura 13-4. Datos guardados correspondientes a la etapa utilizada.	128
Figura 14-4. Transferencia de archivos desde VNC.	128
Figura 15-4. Envío de datos obtenidos de la etapa 1.	129
Figura 16-4. Datos obtenidos a una temperatura de 250°C en la etapa 1 por 13 min.	129
Figura 17-4. Matlab.	130
Figura 18-4. Columna de Vectores de los datos de la etapa 1.	130
Figura 19-4. Vectores definidos en Matlab.	131
Figura 20-4. Curving Fitting Tool de Matlab.	131
Figura 21-4. Ajuste de la curva para parametrizar la función.	132
Figura 22-4. Ingreso de la ecuación característica en la etapa 1.	132
Figura 23-4. Datos y gráfica de la temperatura en la etapa 1.	133
Figura 24-4. Temperatura calculada del termopar a prueba con la temperatura del patrón.	133
Figura 25-4. Requerimientos iniciales para el control del horno.	134
Figura 26-4. Encendido del horno.	135
Figura 27-4. Temperatura establecida en la primera etapa.	135
Figura 28-4. Tabla de valores de Temperatura y tiempo.	136
Figura 29-4. Gráfica de Temperatura vs tiempo con set point 250.	136
Figura 30-4. Parámetros para el cálculo de la función de transferencia.	137
Figura 31-4. Creación de la planta con 2 polos y 1 cero.	138
Figura 32-4. Cálculos de Matlab para la ecuación de la planta.	138
Figura 33-4. Gráfica de la función de transferencia del sistema.	139
Figura 34-4. Parámetros Kp, Ki y Kd obtenidos por Matlab.	139
Figura 35-4. Ingreso de parámetros para el control del horno.	140

Figura 36-4. Gráfica Temperatura vs tiempo en el sistema controlado por PID.	140
Figura 37-4. Sistema sin ningún tipo de control.	141
Figura 38-4. Sistema con control PID.....	141

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Propiedades del aire a la presión de 1 atm.

ANEXO B: Transferencia de calor por radiación, entre dos cilindros concéntricos.

ANEXO C: Transferencia de calor por convección, entre dos cilindros concéntricos.

ANEXO D: Propiedades de metales sólidos.

ANEXO E: Emisividad de superficies metálicas.

ANEXO F: Emisividad de superficies no metálicas.

ANEXO G: Correlaciones empíricas del número de Nusselt para la convección natural sobre superficies.

RESUMEN

En el siguiente trabajo se presenta el diseño y la construcción de un banco didáctico de instrumentación para la calibración de los termopares tipo J, K, & T, y control de un horno de tres etapas. Se utilizó la casa de la calidad para determinar el diseño óptimo del equipo y se analizó diferentes alternativas para el desarrollo de fabricación del mismo. Finalmente se obtuvo un banco eficaz para caracterizar los tres tipos de termopares y controlar de manera automática un horno de tres etapas. El banco consta de un horno eléctrico con 3 cámaras cilíndricas donde se encuentran los termopares, cada cámara o etapa contiene un tipo de termopar, y la elevación de temperatura en cada una se da mediante el uso de resistencias de cuarzo, la ventaja que presenta el equipo es que se puede activar una sola cámara o las tres de manera simultánea. Para la automatización y control del banco se utilizó un microcontrolador Raspberry Pi modelo B+, gracias a ello el banco puede funcionar de manera independiente conectando un monitor y un mouse, o de manera remota con la ayuda de un portátil por medio del programa VNC Viewer, la interfaz de control se desarrolló en Python ya que contiene librerías muy amigables para el usuario, por último, para la adquisición de datos de los sensores de temperatura se adicionó un Arduino nano y son reflejados en un archivo de Excel. Cumpliendo con las recomendaciones de la bibliografía investigada se realizaron ocho ensayos del banco a diferentes temperaturas de trabajo, y analizando los resultados tanto para obtener la ecuación característica de cada tipo de termopar, como para el control PID de cada etapa del horno, se concluyó que el prototipo del banco funciona, se recomienda una mejora al equipo con la implementación de un horno de bloque de estado sólido que es un calibrador industrial certificado.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA>, <DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN>, <TEMPERATURA>, <TERMOPARES>, <CALIBRACIÓN>, <CONTROL>



Firmado electrónicamente por:
JHONATAN RODRIGO
PARREÑO UQUILLAS



13-08-2021

1549-DBRA-UTP-2020

ABSTRACT

The following work presents the design and construction of a didactic instrumentation bench for the calibration of type J, K, & T thermocouples, and control of a three-stage furnace. The quality house was used to determine the optimal design of the equipment and different alternatives were analyzed for the development of its manufacture. Finally, an efficient bench was obtained to characterize the three types of thermocouples and to automatically control a three-stage furnace. The bench consists of an electric furnace with 3 cylindrical chambers where the thermocouples are located, each chamber or stage contains a type of thermocouple, and the temperature rise in each one is given with quartz resistors, the advantage of the equipment is that it can activate a single camera or all three simultaneously. For the automation and control of the bank, a Raspberry Pi model B + microcontroller was used, thanks to this the bank can work independently by connecting a monitor and a mouse, or remotely with the help of a laptop through the VNC Viewer program. The control interface was developed in Python as it contains very user-friendly libraries. Finally, for the acquisition of data from the temperature sensors, an Arduino nano was added, and they are reflected in an Excel file. To fulfill the recommendations of the researched bibliography, eight bench tests were carried out at different working temperatures and analyzing the results to obtain the characteristic equation of each type of thermocouple, as well as for the PID control of each stage of furnace, it was concluded that the bench prototype works, an upgrade to the equipment is recommended with the implementation of a solid state block furnace which is a certified industrial calibrator.

Keywords: <TECHNOLOGY>, <DESIGN AND CONSTRUCTION>, <TEMPERATURE>, <THERMOCOUPLES>, <CALIBRATION>, <CONTROL>

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan de manera pedagógica los conceptos adquiridos en las áreas de instrumentación y control automático y se aplican a situaciones de ámbito laboral e industrial a través del desarrollo de un banco didáctico. Con el paso del tiempo los avances experimentales en comunicaciones, instrumentación e informática han contribuido a la evolución y optimización de mecanismos en los procesos de producción, permitiendo estándares de calidad mucho más altos. Estos avances exigen que los profesionales se encuentren en continua preparación y actualización en cualquiera de estos ámbitos. (BARBECHO; et al., 2013 págs. 65-71).

Los dispositivos de control e instrumentos de medición se encargan del mantenimiento y regulación de las diferentes constantes que existen en todos los procesos de producción, por eso es importante que se encuentren en buen funcionamiento y con la calibración adecuada. Estos procedimientos de calibración tienen como objetivo verificar que un instrumento se encuentre en condiciones óptimas para realizar mediciones confiables, de no ser así se puede realizar algún ajuste para que funcione correctamente o reemplazarlo. (VARGAS, 2006)

Una de las variables de mayor importancia en el sector industrial es la temperatura, ya que esta requiere ser controlada en rangos fijos y de manera constante, para garantizar un producto o servicio de calidad. Existe gran diversidad de instrumentos para la medición de temperatura, uno de los más utilizados son los termopares, gracias a que pueden trabajar a temperaturas altas, y temperaturas bajo cero. El funcionamiento de los termopares se basa en que el voltaje producido por la fuerza electromotriz entre los dos metales que componen el termopar se puede relacionar matemáticamente con un valor de temperatura, es así que la norma ASTM E-230 nos proporciona tablas de valores estandarizados para todos los tipos de termopares.

La carrera de Ingeniería Mecánica de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, cuenta actualmente con laboratorios de instrumentación y control, los cuales poseen equipos destinados a reforzar el conocimiento práctico del estudiante, a estos equipos se les acompañará con un banco didáctico de instrumentación para la calibración de termopares tipo J, K & T, mismo que pretende ilustrar el funcionamiento y calibración necesario en termocuplas al mismo tiempo que intenta de manera ilustrativa exponer el funcionamiento y ventajas del control PID en un sistema térmico.

CAPÍTULO I.

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

(SÁNCHEZ, 2015) *en su investigación “Diseño e Implementación de un banco de Pruebas para el Contraste de Instrumentos de las Variables Físicas Temperatura y Presión”* expone todos los resultados en su diseño, e indica el modelo industrial con resultados satisfactorios en la medición, indicación digital y control de temperatura; incluye el desarrollo de la parte física y la implementación del software para la utilización de diferentes sensores. El objetivo que plantea es contribuir con la formación académica de los estudiantes, explicando de manera real el funcionamiento de los distintos sistemas de calibración actuales. El desarrollo del proyecto se realizó con la correcta selección de los elementos que componen la estructura del banco, y con los instrumentos de medición y control necesarios para generar el sistema, el encargado de controlar todo el equipo es el microcontrolador 18F4550 dividido en módulos, la programación fue desarrollada de una manera que es específica para cada uno de estos módulos, el rango de temperatura que se pueden controlar va desde 20°C hasta los 90°C. Concluyendo, el proyecto SÁNCHEZ (2015) complementa el aprendizaje de los estudiantes desarrollando un análisis con pruebas y experimentos, generando un sistema didáctico de prácticas.

(RODRÍGUEZ; et al., 2016) *en su trabajo de investigación “Caracterización de sensores de Temperatura Termopar, Termistor y RTD”* tienen como objetivo analizar la funcionalidad de cada sensor de temperatura. Para el desarrollo de la investigación utilizaron un PT100 de 3 hilos (RTD), un termopar de tipo J y un termistor de 10kΩ NTC, controlados por medio de un microprocesador PSoC 5lp, ya que contiene una sección específica para cada sensor, obteniendo así una medida precisa y exacta. Las pruebas aplicadas a estos sensores se da a través de un control en la variación de la temperatura del agua, este calentamiento se produce mediante una resistencia de potencia, además realizan procedimientos de calibración con el uso de un equipo especializado llamado sensor Cassy-2. La obtención de datos para el termistor y el RTD es de resistencia vs temperatura, mientras que para el termopar tipo J es de voltaje vs temperatura, los datos obtenidos se tomaron cada 10°C en el rango de 20 a 100°C, es decir desde temperatura ambiente hasta el punto de ebullición del agua. Como conclusión de esta investigación en el análisis de resultados se verificó que el dispositivo de mejor calidad es el termistor ya que tiene una alta precisión, luego tenemos al PT100 ya que su implementación es

más simple comparada a los otros dos, y por último el termopar ya que su precisión es buena pero su exactitud mala.

Según (MORENO, 2007) *en su trabajo de titulación “Sistema Automatizado para la Calibración de Termopares Tipo J”* se indica que, la función principal en muchos laboratorios de calibración es realizar la trazabilidad de equipos e instrumentos bajo prueba, mediante procedimientos basados en estándares de alta confiabilidad; y que la manera de hacer más eficientes estos procedimientos es por medio de una automatización que presente una interfaz de comunicación con una computadora, dicha interfaz puede ser GPIB, USB, RS232, facilitando la comunicación y la conexión de los instrumentos con la pc, así se tiene el control total de los instrumentos con programas que supervisan la operatividad y funcionalidad de los mismos, generando un sistema automatizado para los procedimientos de calibración. La propuesta de esta investigación es proporcionar un sistema automatizado para la calibración de termopares tipo J, para generar este sistema, primero seleccionó los instrumentos, equipos e interfaces que conforman toda la arquitectura, el software que empleó para generar los drivers de todos los instrumentos se denomina Virtual Instrumentation Software Architecture (VISA) y de esta manera realiza una programación gráfica de todo el sistema; los datos de las medidas y las correcciones son registradas en la interfaz dónde genera archivos en Excel. En conclusión, demuestra como generar un sistema de calibración automático con una interfaz para el usuario muy amigable e intuitiva.

(VILLALBA, 2011) *en su investigación “Sistema de Control de Temperatura para la Climatización del Quirófano y la Sala de Recuperación del Hospital Municipal Nuestra Señora de la Merced de la Ciudad de Ambato”* explica que, en la actualidad los avances tecnológicos en instrumentación y control permiten efectuar operaciones de manera más simple y precisa, así todos los procesos que se realizan tanto en el sector industrial y doméstico tienden a mejorar por medio de una automatización apropiada, generando una mejor eficiencia en el resultado final del sistema. La propuesta de su investigación es poder facilitar un ambiente confortable y saludable a todos los pacientes que se encuentren en espacios prioritarios del hospital, debido a que es un establecimiento el cual, al tratar muchas enfermedades a diario, genera áreas de alto riesgo de contaminación. Para resolver la propuesta analizó todos los equipos e instrumentos a utilizar para la automatización, luego determinó todos los parámetros posibles, cómo el tipo de construcción de las áreas a controlar, el número de personas que son permitidas en cada área, y las temperaturas registradas de cada lugar. El control lo realizó con equipos e instrumentos especializados en salud, mediante una automatización programada en un controlador lógico programable (PLC)

obteniendo resultados positivos en las áreas a controlar. Como conclusión del proyecto, se manifiesta que el modelo matemático del sistema es la herramienta principal para anticipar los tiempos de proceso y controlar varios parámetros, en este caso la temperatura en el Quirófano y la sala de recuperación, para establecer un entorno de confort y generar bienestar a los pacientes.

(BARBECHO, Juan; & SARMIENTO, 2013) *en su investigación “Diseño e Implementación de tres bancos didácticos de Instrumentación Industrial para la medición de Fuerza – Desplazamiento y Temperatura en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca”* exponen inicialmente, y de manera general los hechos históricos de la instrumentación, así como su importancia en la actualidad. De este modo analizan los elementos, fundamentos y variables para la correcta selección de medidores de fuerza, desplazamiento y temperatura. Para el desarrollo del diseño de los bancos emplean un árbol de funciones con líneas de conceptos primarias y secundarias, generando el modelo final para cada uno de ellos. En el caso del banco de medición de fuerza y desplazamiento, diseñan las columnas de soporte para el cilindro hidráulico, lo verifican utilizando el software Abaqus, y calculan el factor de seguridad para cada elemento. Para el diseño térmico del banco de temperatura, se describen todos los parámetros a evaluar en una simulación estacionaria para un sólido sometido a cambios de temperatura, en este apartado utilizan el software ANSYS para la simulación, los dispositivos empleados en este banco son dos RTD y un termopar, la evaluación de medición entre estos instrumentos se realiza, primero insertando los tres dispositivos en agua con hielo y luego sumergiéndolos en agua caliente, para tener un rango entre 0 y 100°C, como resultado final de la evaluación mostraron los resultados de lectura propios de cada instrumento, al final presentan los circuitos eléctricos de cada banco, sus diagramas de flujo y la manera de adquirir sus datos. En conclusión, el estudio de la investigación es fiable para la enseñanza de asignaturas tales como Instrumentación, Transferencia de calor y para el desarrollo de posteriores proyectos.

Tras la recopilación y estudio de la información preexistente, se puede concluir que en el ámbito educativo siempre ha existido la tendencia de buscar métodos didácticos que ilustren al estudiante en el funcionamiento de diversos equipos, en el caso de los sensores de temperatura dichos métodos se han presentado en forma de bancos didácticos, que buscan de manera interactiva demostrar las leyes físicas que rigen dichos equipos; Así también, para el estudiante es de suma importancia entender el constante avance tecnológico presente en el funcionamiento de dichas máquinas, tales como la automatización y control automático. Aquí es donde el proyecto actual propone un banco didáctico de calibración de termocuplas, que si bien no es un modelo con resultados sumamente exactos, si tiene la capacidad de explicar al estudiante el funcionamiento y

modelado matemático de tres tipos de termopares, así como también verificar el desempeño y ventajas que el control PID aporta a un sistema térmico (horno).

1.2. Formulación del Problema

Actualmente, el Laboratorio de Instrumentación y Control de la Escuela de Ingeniería Mecánica no cuenta con suficientes bancos didácticos que faciliten la comprensión de los procesos de medición y calibración de variables físicas, e implementarlos en su totalidad resultaría muy costoso para la institución.

Algunos de los fundamentos teóricos impartidos en la carrera de Ingeniería Mecánica que intervienen en asignaturas como Instrumentación Industrial y Control Automático se han desarrollado únicamente para diseñar modelos matemáticos de procesos y circuitos de control mediante el uso de softwares, dejando de lado la parte didáctica en la que el estudiante pueda apreciar de manera física la información presentada. Por lo que, se plantea diseñar y construir un banco didáctico en el que los estudiantes puedan realizar procedimientos de calibración de termopares, encontrar el modelo matemático de un proceso y parámetros adecuados para un control PID óptimo.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación Práctica

El presente proyecto técnico propone desarrollar un banco didáctico para pruebas de instrumentación en el que se simulará un proceso térmico para que los estudiantes puedan verificar, calibrar o ajustar los tres diferentes tipos de termopares realizando prácticas que refuercen todos los conocimientos adquiridos de manera teórica en algunas asignaturas de la carrera.

1.3.2. Justificación Teórica

Este proyecto técnico permite a los estudiantes interactuar de manera directa con la instrumentación y control de una variable física en este caso de la temperatura, en el cual se observan los modelos matemáticos que rigen este proceso, así como también la posibilidad de controlar el proceso térmico establecido por medio de la aplicación de uno de los sistemas de control.

1.3.3. Justificación Metodológica

Este proyecto recopila información sobre procesos térmicos controlados, así como la instrumentación necesaria para elaborar y desarrollar una propuesta en la que se incluyan todos los fundamentos conocidos para facilitar la fabricación del banco didáctico.

1.4. Alcance

El proyecto tiene como finalidad diseñar y construir un banco de pruebas, el cual permita la medición de la temperatura de un proceso térmico, además de permitir calibrar los tipos de termopares existentes más comunes en el mercado, teniendo como referencia otro grupo de termopares originalmente calibrados, así como también la comparación de sus respectivas curvas características, conjuntamente se realizará el control de temperatura del proceso térmico, mismo que se generará gracias a la utilización de distintos sistemas de control de la variable física, los datos de dicho proceso se recolectarán mediante el uso de un dispositivo de adquisición de datos.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Diseñar y construir un banco didáctico de instrumentación para la calibración de los termopares tipo J, K & T, y control de un horno de tres etapas.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Estudiar y analizar el funcionamiento de distintos termopares, así como las leyes que los rigen.
- Elegir los elementos electrónicos, mecánicos y de control adecuados para el banco de pruebas.

- Implementar un horno de tres etapas, como medio de análisis para la comparación de datos de los termopares no calibrados con referencia al termopar patrón.
- Obtener los datos de medición de los instrumentos en función del tiempo necesarios para el proceso de control del horno.
- Implementar un control para el proceso térmico por medio de un controlador.
- Elaborar una guía de procedimiento de utilización del banco de pruebas con un mínimo de dos laboratorios.

CAPÍTULO II.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presenta todo el marco teórico correspondiente al desarrollo del proyecto: los conceptos básicos de temperatura, los distintos instrumentos para medir esta variable física, el funcionamiento de un termopar, los tipos de termopares; la importancia y ventajas de utilizar hornos eléctricos, además del diseño térmico del mismo. Así también se analizaron conceptos básicos de automatización y control automático, control PID, microcontroladores y uso de Software en el proceso de control.

2.1. Temperatura

La Temperatura es una magnitud física que determina la cantidad de energía térmica o calor que un cuerpo o un ambiente posee. Esta energía térmica está relacionada directamente con el movimiento de las partículas de una masa. Existen propiedades de la materia que dependen de la temperatura como el estado, la solubilidad y el volumen, tomando como ejemplo el agua en condiciones normales, es decir a presión atmosférica, si la temperatura se encuentra a 0°C estará en estado sólido (hielo), si se encuentra de 1°C a 99°C estará en estado líquido y por último si se encuentra de 100°C en adelante se encuentra en estado gaseoso (vapor). (Pérez et al., 2012, p.1)

Para la medición de la temperatura existen diferentes escalas, entre las más importantes están:

- Escala Celsius (°C)
- Escala Fahrenheit (°F)
- Escala Kelvin (°K)
- Escala Rankine (°R)

2.1.1. Medición de la Temperatura en el sector Industrial.

No es posible medir directamente la temperatura, por lo que se debe deducir el efecto que tienen sus cambios con ayuda de magnitudes termométricas, es decir, unidades o cantidades que varían con la temperatura. La expansión lineal de un líquido o la resistencia eléctrica de un metal pueden ser un claro ejemplo de estas unidades termométricas. (Lab-Volt, 2005 pp.23-28)

En los procesos industriales los dispositivos más utilizados para la medición de la temperatura son los siguientes:

- **Termómetro de líquido en vidrio** su principio de medición se basa en la expansión y contracción del líquido con el cambio de la temperatura, uno de los más conocidos y utilizados a lo largo de la historia es el termómetro de mercurio. (Hernández y Martínez, 2016: pp.2-5)
- **Termómetro de Resistencia (Pirómetro de Resistencia)** estos dispositivos dependen del cambio de la resistencia eléctrica de un metal en función de la temperatura. Para este tipo de termómetros los metales más utilizados son el platino, níquel, cobre y molibdeno. (Hoyos y Hurtado, 2004: pp.97-102)
- **Termopares o Pares Térmicos** estos instrumentos de medición están compuestos por dos alambres de metales o aleaciones que generan un voltaje eléctrico proporcional a la temperatura. (Lab-Volt, 2005, p.23)
- **Pirómetros** son dispositivos que calculan la temperatura a través de la radiación térmica. Los pirómetros tienen la ventaja de registrar la temperatura de superficies u objetos sin tocarlas y a distancias alejadas. (Rolle, 2006, p.62)
- **Termómetros Bimetálicos** están constituidos por una espiral bimetálica que está colocada en el interior de un tubo de acero inoxidable. A medida que la temperatura cambia produce una deformación en el bimetal que mediante la rotación de la varilla se transmite a la aguja indicadora. (Martínez, 2010, p.171)
- **Termómetro de Gas** en estos instrumentos de medición la temperatura es independiente a la sustancia que se encuentra en el termómetro, lo que se aprovecha es la variación de la presión con la temperatura para un volumen fijo de gas. (Serway y Faughn, 2001: p.315)
- **Termómetros digitales** están compuestos por un circuito electrónico que mide la temperatura para luego enviarla a un microchip el cuál la procesa y la muestra en una pantalla digital. (Huerta, 2012, p.2)
- **Termistores** son tipos de resistencias que varían con el cambio de temperatura. Existen dos tipos de termistores, los termistores con coeficiente de temperatura positivo los cuales aumentan su resistencia a medida que la temperatura crece y los termistores con coeficiente de temperatura negativa donde su resistencia disminuirá cuando la temperatura crece. (Whitman y Johnson, 2006: p.35)

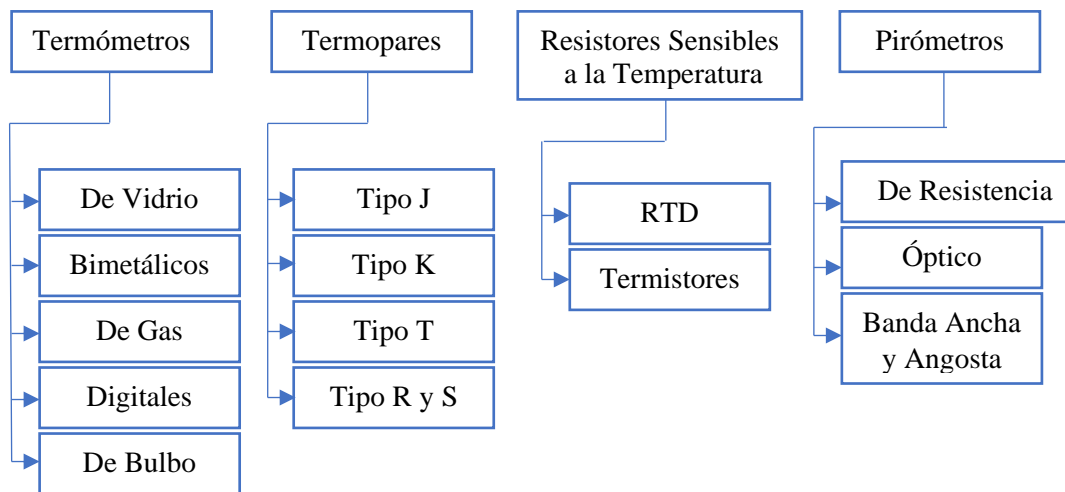


Figura 1-2. Tipos de dispositivos más comunes para la medición de la Temperatura.
 Fuente: (Lab-Volt, 2005, p.34)

2.1.2. Medición de Temperatura con Termopares o Termocuplas

Las Magnitudes físicas en la actualidad se pueden medir con mayor exactitud gracias a la ayuda de los sensores electrónicos. Ya que regularmente los sensores entregan señales muy pequeñas necesitan acondicionadores para equilibrar sus características con las del circuito, esto es de suma importancia ya que les permiten adquirir, procesar y actuar con las señales. Probablemente sea la temperatura el parámetro físico más común que se mide en un proceso industrial, como en la producción de acero y materiales cerámicos, entre otros, incluso cuando es otro parámetro el de vital importancia ésta se mide para actuar de manera indirecta en la medida deseada. (ALZATE et al., 2007: pp.1-2)

El Termopar o Termocupla es un dispositivo que mide la temperatura, basado en el efecto Seebeck, descubierto por el físico médico alemán Thomas Seebeck, éste consiste en un arreglo de dos alambres de distinto material unidos por un extremo, al calentar uno de los dos metales genera un flujo de corriente y a su vez genera una diferencia de voltaje, mientras que al otro metal se lo denomina unión fría, el cuál por lo general se encuentra a temperatura ambiente. (Rodríguez et al., 2016: p.9)

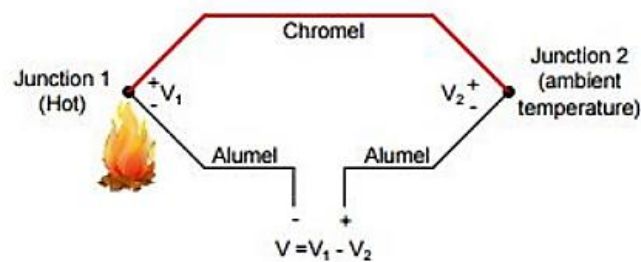


Figura 2-2. Esquema de uniones en una Termocupla.

Fuente: (Rodríguez et al., 2016, p.9)

Para el funcionamiento de los termopares existen algunas leyes que los rigen, que serán enunciadas a continuación:

- Si en la construcción de un termopar los dos materiales utilizados en sus conductores son homogéneos entonces la fuerza electromotriz del par termoeléctrico resulta inafectada por la temperatura en todo el circuito; es decir, la tensión producida no se afecta cuando los alambres que conectan las dos uniones son sometidos a una temperatura cualquiera. (Moreno, 2007, p.10)
- Si en el circuito termoeléctrico se incluye un tercer metal homogéneo, la fuerza electromotriz neta o total no se verá alterada si se mantiene una temperatura constante, lo cual involucra a las uniones de soldadura de platino o a la introducción de un aparato para medir la tensión eléctrica del circuito. (Moreno, 2007, p.11)
- Si se tiene un circuito termoeléctrico a temperatura constante y compuesto de distintos materiales, entonces la suma algebraica de las fuerzas electromotrices producidas en el circuito es cero; es decir, necesariamente debe existir una diferencia de temperatura en el circuito termoeléctrico para calcular una temperatura indeterminada. (Moreno, 2007, p.11)

Es importante conocer la temperatura de la unión de referencia utilizando algún método independiente, siempre que se use un termopar para medir una temperatura desconocida. La temperatura medida se obtiene mediante una ecuación de referencia en función de la fuerza electromotriz producida en el termopar. (Moreno, 2007, p.11)

Existen muchas combinaciones posibles de dos metales estudiados, y en la actualidad estos pares de metales tienen características específicas de diferencia de voltaje en relación con la diferencia

de temperatura. La norma ANSI/ASTM E-230 ha estandarizado los diferentes pares de metales y codificado el color para termopares, cables y conectores, en la Tabla 1-2 se detalla cada termopar.

Tabla 1-2. Tipos de Termopares y código de colores.

Código de color ANSI	Combinación de Aleación.		Comentarios Entorno Cable Pelado	Rango de temp. máximo grado termopar	FEM(mV) en todo el rango de temp. máximo
	Positivo	Negativo			
J	HIERRO Fe (Magnético)	CONSTANTÁN CUPRONÍQUEL Cu-Ni	Reductor, vacío, inerte. Uso limitado en entornos oxidantes a altas temperaturas. No se recomienda para temperaturas bajas.	-210 a 1200°C -346 a 2193°F	-8.095 a 69.553
K	CHROMEOMEGA NICROMO Ni-Cr	ALOMEGA NIQUEL ALUMINIO Ni-Al	Oxidante limpio e inerte. Uso limitado en vacío o atmósfera reductora. Amplio rango de temperatura, la calibración más popular.	-270 a 1372 °C -454 a 2501°F	-6.458 a 54.886
T	COBRE Cu	CONSTANTÁN CUPRONÍQUEL Cu-Ni	Ligeramente oxidante. Bueno en condiciones de humedad presente. Aplicaciones a temperaturas bajas y criogénicas	-270 a 400°C -454 a 752°F	-6.258 a 20.872
E	CHROMEOMEGA NICROMO Ni-Cr	CONSTANTÁN CUPRONÍQUEL Cu-Ni	Oxidante o inerte. Uso limitado en vacío o atmosférica reductora. El cambio más alto de FEM por grado	-270 a 100°C -454 a 1832°F	-9.835 a 76.373
N	OMEGA-P NICROSIL Ni-Cr-Si	OMEGA-N NICROSIL Ni-Si-Mg	Alternativa a tipo k. Más estable a temperaturas altas	-270 a 1300°C -450 a 2372°F	-4.345 a 47.513
R	PLATINO 13% RODIO Pt-13%Rh	PLATINO Pt	Oxidante o Inerte. No insertar en tubos metálicos. Cuidado con la contaminación. Temperatura alta.	-50 a 1768°C -58 a 3214°F	-0.226 a 21.101
S	PLATINO 10% RODIO Pt-10%Rh	PLATINO Pt	Oxidante o Inerte. No insertar en tubos metálicos. Cuidado con la contaminación. Temperatura alta.	-50 a 1768°C -58 a 3214°F	-0.236 a 18.963
R/SX	COBRE Cu	COBRE-BAJO NIQUEL Cu-Ni	Cable de conexión de grado de extensión para termopares R & S. también conocido como cable de extensión RX y SX		
U	COBRE Cu	COBRE Cu	No compensado para uso con RTDS y termistores.		
B	PLATINO 30% RODIO Pt-30%Rh	PLATINO 6% RODIO Pt-6%Rh	Oxidante o inerte. No insertar en tubos metálicos. Cuidado con la contaminación. Uso común en la industria del vidrio.	0 a 1820°C 32 a 3308°F	0 a 13.820
G (w)	TUNGSTENO W	TUNGSTENO-26% RENIO W-26%Re	Vacío, inerte, hidrógeno. Cuidado con la fragilización. No es práctico por debajo de 399°C(750°F). No apto para atmósfera oxidante.	0 a 2320°C 32 a 4208°F	0 a 38.564

C (W5)	TUNGSTENO - 5% RENIO W-5%Re	TUNGSTENO - 26% RENIO W-26%Re	Vacío, inerte, hidrógeno. Cuidado con la fragilización. No es práctico por debajo de 399°C(750°F). No apto para atmósfera oxidante.	0 a 2320°C 32 a 4208°F	0 a 37.066
D (W3)	TUNGSTENO - 3% RENIO W-3%Re	TUNGSTENO - 25% RENIO W-25%Re	Vacío, inerte, hidrógeno. Cuidado con la fragilización. No es práctico por debajo de 399°C(750°F). No apto para atmósfera oxidante.	0 a 2320°C 32 a 4208°F	0 a 39.506

Fuente: Normas ANSI/ASTM E-230 (ANSI/ASTM E-230)

Los termopares más utilizados en diferentes aplicaciones son los tipos J, K y T, cada uno de estos dispositivos tiene un rango de temperatura y un entorno de trabajo diferente. Si bien la combinación del termopar establece la gama de temperaturas, para llegar a su temperatura máxima el diámetro del cable también es un limitante. Es decir, que un termopar delgado no podría alcanzar el rango de temperatura deseado. (Medrano, 2002, pp.1-4)

Como todos los instrumentos de medición los termopares tienen un rango de error permitido o también denominado tolerancia, la norma ANSI/ASTM E-230 también indica las tolerancias para cada termopar presentadas en la Tabla 1-2.

2.1.2.1. Termopar Tipo J

Es el tipo de termopar más utilizado por su bajo costo y su alto rango de medición, presentan limitaciones en entornos oxidantes a altas temperaturas y no es recomendable para temperaturas bajas. Está compuesto de un conductor positivo de Hierro y un conductor negativo de Constantán, que es una aleación compuesta de 55% de Cobre y 45% de Níquel. Es sensible magnéticamente a su elemento positivo Hierro. (Vega y Velázquez, 2019: pp.1-4)

2.1.2.2. Termopar Tipo K

Este sensor es el más empleado en la instrumentación con altas temperaturas, siendo este rango de temperatura la más popular para la calibración, en su elemento positivo contiene Chromel que está compuesto de 90% de Níquel y 10% de Cromo y en su elemento negativo tiene Alumel que está compuesto de 95% de Níquel, 2% de Manganeso, 2% de aluminio y 1% de Silicio. Se puede identificar al Chromel cuando se realiza una prueba de campo debido a que es sensible a la acción de un imán. (Vega y Velázquez, 2019: pp.1-4)

2.1.2.3. Termopar tipo T

Este sensor se usa frecuentemente para aplicaciones de bajas temperaturas, además de soportar condiciones de humedad, su elemento positivo es de Cobre al 100% y su elemento negativo de Constantán una aleación compuesta de 55% de Cobre y 45% de Níquel, a diferencia de los termopares tipo J y K este dispositivo no tiene sensibilidad a los campos magnéticos. (Vega, y Velázquez, 2019: pp.1-4)

2.1.3. Calibración de Temperatura.

La calibración se define como un grupo de operaciones que establecen, en unas condiciones específicas, la relación que existe entre los valores de las medidas mostradas por un instrumento de medición, y los valores correspondientes de las medidas realizadas por los patrones. (RIU et al., 2007)

En la industria las mediciones y la calibración de los equipos tienen una gran importancia, ya que ayudan a diseñar y elaborar un servicio o un producto que cumplen con todas las necesidades o exigencias del cliente.

La finalidad de llevar a cabo procedimientos de calibración es comprobar que un instrumento se encuentre en óptimas condiciones para realizar mediciones confiables, de no ser así se puede realizar un ajuste para que funcione correctamente o reemplazarlo.

En la actualidad, Ecuador ha evolucionado en desarrollar laboratorios de metrología y calibración de última generación, sin embargo, la desventaja que presentan estos laboratorios nacionales es el bajo alcance de medición para diferentes magnitudes, así como el tiempo que ocupan en la calibración de un dispositivo o equipo determinado. (Aviléz, 2016, p.8)

El Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE), es el encargado de acreditar los diferentes laboratorios de metrología y calibración en el país bajo la norma NTE INEN-ISO/IEC 17025, esta norma contiene los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. A continuación, se da a conocer algunos de los diferentes laboratorios acreditados en la actualidad.

- Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Centro de Metrología del Ejército Ecuatoriano.
- Laboratorios privados como: Tecnipresición, Metrolab, Metrologic, etc. (Aviléz, 2016, p.9)

La norma ASTM E-220 presenta el método estándar para la calibración de termopares mediante técnicas de comparación, este método especifica los equipos, principios y el procedimiento para la calibración de termopares en comparación con un termómetro de referencia. (ASTM E220-07e1)

Para la utilización de esta norma se necesitan equipos especializados de calibración, así como una fuente de calor con alta exactitud como son los bloques de estado sólido o bloques secos y los baños líquidos.

2.1.4. Equipo para calibración.

Para realizar la calibración de un termopar, por lo general se ocupa el siguiente equipo:

- Patrón o termopar de referencia.
- Indicador para el termopar bajo prueba.
- Indicador para el termopar de referencia.
- Fuente de temperatura.

2.1.4.1. Patrón de referencia

La representación física de una unidad de medición se indica a través de un patrón, así estos patrones son utilizados como instrumentos de referencia, ya que muestran el valor “real” de una magnitud específica. Existen muchas categorías de patrones, entre los más importantes están los siguientes.

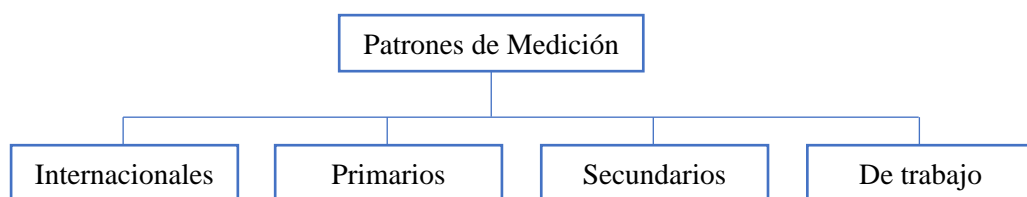


Figura 3-2. Clasificación de patrones de medición.

Fuente: (Calderón, 2018, p.26)

- **Patrones Internacionales** son patrones que representan ciertas unidades de medida con la mayor exactitud posible conocidos por un acuerdo internacional.
- **Patrones Primarios** estos patrones son reconocidos por laboratorios nacionales de un país, y debido a su alta cualidad metrológica son utilizados como referencia para valores de una magnitud específica.

- **Patrones Secundarios** son patrones básicos que necesitan ser referenciados a un patrón primario para establecer su magnitud, se usan en laboratorios industriales de medición.
- **Patrones de trabajo** son patrones que se utilizan frecuentemente para verificar y calibrar instrumentos o equipos de medición. (Calderón, 2018, pp.26-31)

2.2. Horno

Un horno es un dispositivo que produce calor y lo mantiene dentro de una cámara cerrada, se usa principalmente para la preparación de alimentos y en el sector industrial para la fundición y calentamiento de materiales, la energía necesaria para alimentar un horno puede ser directa mediante el uso de combustibles o indirecta por medio del empleo de la electricidad. (Robalino y Sánchez, 2016, pp.23-24)

2.2.1. Hornos Eléctricos

Son hornos de fácil manejo gracias a que utilizan energía eléctrica además de sus diseños con sistemas de programación muy útiles. Existen varios tipos de hornos eléctricos que se emplean tanto para uso doméstico e industrial, esto depende directamente con la temperatura que se desea alcanzar. (Robalino y Sánchez, 2016: pp.25-26)

Los hornos eléctricos en la actualidad son muy utilizados gracias a sus innovaciones y sus perfecciones en su tipo, además éstos ofrecen muchas ventajas las cuales se mencionan a continuación:

- En muchos tipos de hornos eléctricos se puede llegar a obtener temperaturas realmente altas de hasta 3500°C.
- Pueden tener regulaciones totalmente automáticas en el control de la velocidad con la que se eleva la temperatura, manteniéndola en un rango de límites con mucha precisión.
- No presentan contaminación por la utilización de combustible.
- Los revestimientos que utilizan tienen mayor duración.
- Su instalación se realiza en espacios reducidos.
- La higiene en su operación es mucha más alta que en los otros tipos de horno. (Gutiérrez, 2015, p.10)

Ya que este tipo de hornos se utilizan mucho en el área doméstica como en la industrial existen una gran variedad en el mercado, En temas industriales son cada vez más utilizados en el sector

de fundición de metales y de acuerdo a su importancia, en este entorno se pueden clasificar en tres grupos importantes con el orden correspondiente. (García y Muñoz, 2013: p.23)

2.2.2. Hornos Eléctricos de Resistencias

El sistema de calentamiento de este tipo de hornos es producido por el efecto Joule, es decir el calor se produce cuando circula una corriente eléctrica a través de una resistencia. La transferencia del calor generado en la resistencia hacia el material contenido se provee por medio de radiación y convección. Para evitar disipar energía calorífica la cámara de calentamiento debe estar totalmente aislada, en casos de necesitar una capacidad todavía mayor de aislamiento se recomienda el uso de materiales refractarios porosos y mantas de alúmina. (Gutiérrez, 2015, pp.10-12)

2.2.2.1. Ventajas del uso de Hornos Eléctricos de Resistencia

Las ventajas que este tipo de horno presenta varían mucho en la industria, entre las más importantes están:

- **Eficiencia:** La conversión de la energía eléctrica en calor tiene un coeficiente cerca del 100%, a diferencia de otros tipos de hornos que usan combustibles, ya que parte de esta energía se pierde cuando se expulsa a la atmósfera el aire que se calienta y los gases que se producen.
- **Limpieza:** No existe mucha contaminación en la combustión de los materiales, por no presentar gases, chimeneas, o polvos.
- **Control:** El calor que se proporciona al sistema tiene un control más simple y exacto que cualquier otro tipo de horno.
- **Temperatura:** el control de la temperatura es muy preciso.
- **Altas Temperaturas:** se alcanzan grandes temperaturas de una manera más económica que los hornos que usan combustibles. (Gutiérrez, 2015, p.11)

2.2.3. Tipos de Resistencia

El calentamiento del material en los hornos se produce de una forma indirecta, es decir se calientan a través de la radiación y la convección que producen las resistencias que están muy cerca pero no en contacto del producto a calentar.

A continuación, se muestra una clasificación de las resistencias que entregan calor indirecto:

- Metálicas
- No Metálicas
- Tubos Radiantes
- Resistencias Blindadas (Robalino y Sánchez, 2016: p.32)

2.2.3.1. Resistencias Blindadas

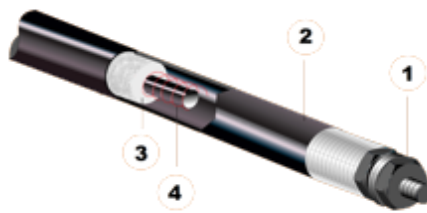


Figura 4-2. Resistencia Blindada con sus partes. 1) Blindada. 2) Forro Metálico. 3) Óxido de magnesio. 4) Bobina Níquel – Cromo.

Fuente: (Kintel, 2020)

Este tipo de resistencias son muy diferentes ya que la bobina está embebida en una masa refractaria de magnesita que se encuentra dentro de una funda metálica. Se emplean en aplicaciones donde no se necesiten temperaturas muy altas, las fundas metálicas pueden ser de diferentes materiales como de acero inoxidable, acero al carbono o latón. (Méndez y Suasnavas, 2012: p.38)

Las resistencias de cuarzo son muy utilizadas en aplicaciones industriales que se necesite una calefacción muy rápida. Estos elementos a pleno rendimiento pueden llegar en tan sólo 30 segundos a temperaturas de 500°C a 1000°C.

2.2.4. Aislantes Térmicos.

Los aislantes térmicos son materiales con propiedades que tienden a oponerse a la transferencia del calor ya sea por convección, conducción y radiación. La conductividad térmica es la propiedad más importante de estos materiales, este coeficiente indica la facilidad que tiene para transferir el calor, cuanto más bajo sea este valor mejor será su capacidad aislante. Otros factores que intervienen con el poder aislante de estos componentes es la naturaleza de su material, el espesor y la temperatura en la que será empleado. En la Tabla 2-2, se menciona los aislantes más utilizados con su respectivo coeficiente de conductividad térmica. (Cano, 2017, pp.30-34)

Tabla 2-2. Conductividad y resistencia a compresión de los materiales aislantes.

Origen Sintético Orgánico	Conductividad λ (W/m.K)	Resistencia a compresión (kPa)
Poliestireno Expandido	0,037	300
Poliestireno Extruido	0,032	200
Poliuretano	0,028	200
Espuma Fenólica	0,021	200
Espuma Elastómera	0,035	200
Espuma de Polietileno	0,035	200
Espuma de Polipropileno	0,032	250
Espuma de Melamina	0,035	20
Espuma de Poliisocianurato	0,022	300
Policarbonato Celular	0,021	800
Origen Inorgánico	Conductividad λ (W/m.K)	Resistencia a compresión (kPa)
Lana de vidrio	0,034	16
Lana de roca	0,036	68
Vidrio celular	0,048	785
Arcilla expandida	0,080	700
Vermiculita	0,050	200
Perlita	0,035	1200
Hormigón celular	0,090	2900
Aerogel	0,013	130
Origen Natural Orgánico	Conductividad λ (W/m.K)	Resistencia a compresión (kPa)
Corcho negro	0,040	180
Corcho natural	0,045	180
Fibra de madera	0,036	290
Fibra de cañamo	0,039	147
Fibra de lino	0,039	5
Pasta de celulosa	0,038	78
Lana de oveja	0,040	68

Fuente: (CANO, 2017)

2.3. Conceptos para el diseño estructural y térmico de elementos.

Aquí se presentan todos los conceptos necesarios para el diseño estructural y térmico que intervienen en la construcción del banco didáctico. Asegurando así, el correcto funcionamiento del banco y sus componentes.

2.3.1. Límite de elasticidad de un material.

El límite elástico de un material es el valor máximo de fuerza que un material puede soportar sin presentar deformaciones y sufrir deformaciones de forma permanente. (Imaz, 2015)

Este límite es muy importante ya que la relación que tiene con el esfuerzo máximo de un elemento o una estructura nos garantiza un factor de seguridad.

2.3.2. Dilatación térmica.

Todo elemento sometido a temperaturas altas, y con extremos restringidos tiene la tendencia de sufrir esfuerzos en el material produciendo en ocasiones deformaciones permanentes.

2.3.3. Primera ley de la termodinámica.

La conservación de la energía o primera ley de la termodinámica establece que la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma. (Çengel, 2007, p.11).

2.3.4. Calor sensible.

Este tipo de calor está asociado con la energía cinética o el movimiento de las moléculas en el interior de un sistema. Este movimiento de las moléculas es directamente proporcional al valor de temperatura de un sistema o un cuerpo.

2.3.5. Transferencia de calor por radiación.

La transferencia de calor por radiación es la cantidad de energía en forma de ondas electromagnéticas que produce una superficie. (ÇENGEL, 2007, pp.709-730)

La transferencia de calor por radiación de dos cilindros concéntricos de distinto material, está expresado así.

2.3.6. Transferencia de calor por convección.

La transferencia de calor por convección se produce entre un fluido que se encuentre en movimiento y la superficie de un sólido. (ÇENGEL, 2007, pp.504-540)

2.3.6.1. Número de Nusselt.

Es un número sin dimensiones que representa la mejora de la transferencia de calor a través de una película o capa de fluido como resultado de la convección. (ÇENGEL, 2007, pp.581-587)

2.3.6.2. Temperatura película.

La temperatura de película, es la temperatura promedio entre la temperatura del fluido y de la superficie, esta temperatura es importante para la transferencia de calor por convección ya que las propiedades del fluido son constantes en la misma. (ÇENGEL, 2007, pp.587-598)

2.3.6.3. Número de Grashof

Es un número adimensional llamado así en honor al ingeniero alemán Franz Grashof, y representa la razón de flotabilidad de un fluido con respecto a las fuerzas viscosas. (ÇENGEL, 2007, p.509-515)

2.3.6.4. Número de Rayleigh

El número de Rayleigh indica la razón de las difusividades térmicas y fuerzas de flotabilidad con la cantidad de movimiento, su expresión matemática es la multiplicación del número de Grashof con el número de Prandtl.

2.3.7. Convección Natural o Libre.

Se produce por el movimiento del fluido sobre una superficie más caliente, por el cambio de densidad, el aire caliente sube y el aire frío lo reemplaza generando una corriente de flujo. En el siguiente gráfico se puede observar un ejemplo de convección libre.

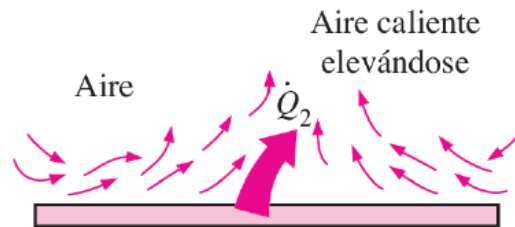


Figura 5-2. Convección Natural.
Fuente: (ÇENGEL, 2007)

2.3.8. Transferencia de calor por conducción.

Es la transferencia de calor entre las partículas más energéticas de una sustancia, hacia las partículas menos energéticas.

2.4. Sistemas microcontrolados.

En la actualidad sorprendente lo común que se ha vuelto ver los procesos casi en su mayoría dirigidos por microcontroladores. Sistemas tan sencillos como cafeteras, videograbadoras, alarmas, hornos, etc.

La sencillez que presenta un microcontrolador al procesar datos y la toma de decisiones, además de la posibilidad de manejar señales de entrada y salida lo han convertido en uno de los elementos más versátiles en el control de todo tipo de equipos.

El diagrama general de un sistema microcontrolado se muestra en la Figura 6-2.

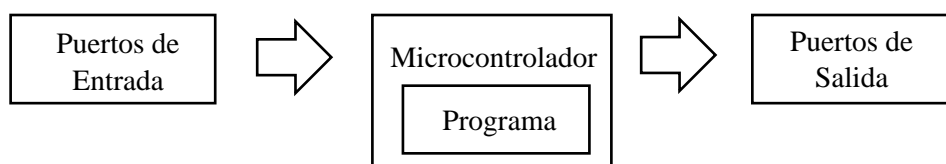


Figura 6-2. Diagrama de un sistema microcontrolado.
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020

2.5. Microcontroladores.

Un microcontrolador es un circuito integrado programable constituido internamente por todos los componentes que conforman un computador. El microprocesador al estar correctamente programado lleva a cabo sistemáticamente la tarea específica que se le asignó.

Las partes básicas de un microcontrolador son:

- **Memoria ROM:** Memoria solo de lectura, utilizado para el almacenamiento de datos del microcontrolador.
- **Memoria RAM:** Memoria de almacenamiento aleatorio, siendo esta la memoria principal que utiliza el microprocesador donde se efectúan las operaciones de lectura y escritura del proceso.
- **Puertos de entrada y salida:** La interfaz donde se conectan elementos externos al que interactúan con el microcontrolador.
- **Lógica de control:** Define como responderá el sistema ante cambios o eventos condicionales.

2.5.1. Microcontrolador Arduino.

El hardware libre Arduino consiste en una placa que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines de entrada los cuales permiten la comunicación con los puertos de entrada y salida, los que permiten conectar de manera sencilla y cómoda distintos tipos de elementos como sensores actuadores y módulos varios. (Simon, 2018, pp.11-12)

Arduino no solo está basado en hardware sino también en su propio software de código abierto, dicho software es de uso sencillo por lo que facilita multitud de aplicaciones, ya sean estos procesos autónomos o con comunicación a un ordenador.

2.5.1.1. Tipos de Arduino.

Al existir infinidad de proyectos y situaciones que requerirán del uso de sistemas Arduino, la empresa ha creado distintas opciones que se amoldan a cada necesidad, los más utilizados son:

- Arduino UNO

- Arduino Dúo
- Arduino Mega ADK
- Arduino Ethernet
- Arduino Pro
- Arduino Mini
- Arduino Micro
- Arduino Nano (Hidalgo, 2015, pp.20-24)

2.5.2. Raspberry Pi (UPS)

El Raspberry Pi es un integrado de placa reducida (placa única) muy potente y de bajo costo capaz de reproducir las funciones de un ordenador, con la ventaja de contar con una estructura física reducida. Esta placa tiene su origen en el año 2006 en el Reino Unido con el fin de enseñar programación a los estudiantes de escuelas y universidades, pero tuvo su desarrollo en el año 2011 con sus versiones iniciales a cargo de la Fundación Raspberry Pi de la Universidad de Cambridge para su posterior comercialización en el año 2012, año desde el cual se han tenido constantes actualizaciones de sus modelos de placas, entre los cuales se tienen: (Cusi y Sánchez, 2016: pp.13-14)

- Raspberry Pi A (Agosto 2011)
- Raspberry Pi B (Febrero 2012)
- Raspberry Pi B+ (Julio 2014)
- Raspberry Pi A+ (Noviembre 2014)
- Raspberry Pi 2 MODEL B (Febrero 2015)
- Raspberry Pi 3 MODEL B (Febrero 2016)
- Raspberry Pi 3 MODEL B+ (Marzo 2018) (Cusi y Sánchez, 2016: pp.13-14)

2.5.2.1. Raspberry Pi 3 MODELO B+

Esta placa es una actualización sutil del Modelo Pi 3 B, las mejoras más significativas radican en un overclock al CPU y soporte wifi, además de un disipador para controlar mejor las temperaturas de trabajo y al igual que sus anteriores versiones hace uso de su código abierto y software libre, para ejecutar los procesos de la forma más óptima posible. (Raspberry, 2020)

2.6. Automatización Industrial

La automatización Industrial se podría definir como la integración de procedimientos y elementos computarizados, tanto en hardware como en software que permiten controlar los procesos industriales de forma autónoma o automática, haciendo uso de tecnologías con el fin de maximizar la productividad y confiabilidad de las empresas reduciendo así costos de fabricación y mejorando la calidad de los productos. Actualmente estos avances han dado pasos agigantados, esto debido a los constantes avances en la informática y microelectrónica, mediante los cuales cada vez existe mayor facilidad en la integración entre procesos productivos y niveles de toma de decisiones. (Lojan, 2015, pp.11-27)

2.6.1. Elementos que conforman un Sistema automatizado.

La estructura de un sistema automatizado se compone por una parte operativa, encargada de ejecutar las distintas actividades que constituyen el proceso a través de los distintos elementos que lo conforman; y una parte de control encargada de coordinar las tareas del proceso, entre estas se encuentran la gestión de herramientas, el control de calidad, y las operaciones de supervisión. (Cruz, 2017, pp.10-12)

El modelo estructural del sistema automatizado se presenta en la Figura (7-2).

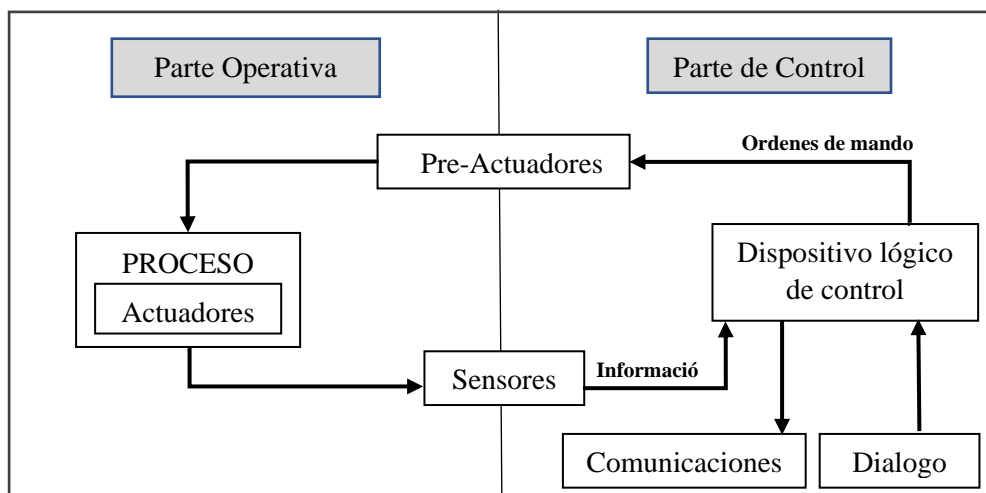


Figura 7-2. Esquema de un sistema automatizado

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020

2.7. Sistemas de Control.

Tomando en cuenta que la información que un sistema automatizado recibe del exterior se denomina señal de entrada o input, y a las condiciones que existen en el exterior después de la actuación del automatismo se denomina señal de salida u output. (Torres y Chanoluisa, 2015: pp.8-20) Se puede definir al sistema de control, como el proceso que tiene como objetivo que las señales de salida sean gobernadas por las directrices establecidas por las señales de entrada, independientemente de las perturbaciones que puedan existir. Se establece, por ejemplo, en el control automático de un sistema de climatización de un cuarto frío, el termostato permite al usuario establecer la temperatura deseada (señal de entrada); la temperatura del cuarto será la señal de salida y el cambio de temperatura por la apertura de las puertas, así como por el tránsito de personas serán las perturbaciones. El Objetivo del control será que el cuarto se mantenga en el valor establecido en el termostato originalmente.

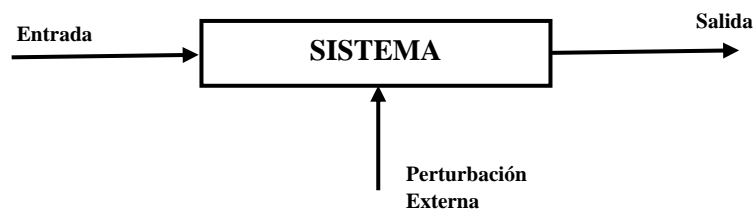


Figura 8-2. Esquema de un sistema de control

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020

Las señales pueden ser temperaturas, presiones, velocidades, etc. No obstante, debido a que la tecnología moderna se basa en señales eléctricas, se utilizan transductores para convertir señales de cualquier tipo a otras de naturaleza eléctrica.

2.7.1. Componentes básicos de los sistemas de control.

- **Planta:** Se denomina planta a cualquier elemento o elementos físicos a controlarse (hornos, bombas hidráulicas, sistemas neumáticos, etc.) En resumen, la planta es la instalación física destinada a ejecutar un proceso determinado.
- **Proceso:** operación ejecutada progresivamente, que se encuentra en un constante desarrollo de cambios graduales que busca alcanzar el resultado deseado en la operación planteada. Entonces, en adelante se llamará proceso a todo aquello que se vaya a controlar.

- **Sistema:** conjunto de elementos interrelacionados e interconectados que trabajan conjuntamente destinados a producir un objetivo determinado.
- **Entrada:** señal de entrada, también llamada estímulo, es la señal de excitación que es aplicada al sistema de control.
- **Salida:** Condiciones finales manifestadas en el sistema ante un estímulo dado.
- **Perturbaciones:** Señal de entrada no planeada ni controlada que aparece de forma fortuita en el sistema alterándolo adversamente, esta puede ser de origen interno o externo.
- **Control:** Se lo puede definir como la modificación dispuesta de manera predeterminada de la energía suministrada con el fin de corregir el comportamiento al deseado originalmente. (Benites, 2018, pp.3-20)

2.7.2. Tipos de sistemas de control.

Los distintos sistemas de control a pesar de buscar alcanzar el mismo fin pueden abordar el proceso de manera distinta por lo cual se los ha dividido comúnmente en sistemas de control a lazo abierto y sistemas de control a lazo cerrado. (Carrillo, 2011, pp.15-30)

2.7.2.1. Sistema de control a lazo abierto

Sistema de control en el cual la señal de entrada no influye en la señal de salida (variable controlada), es decir que no existe realimentación en la salida para equipararla con la entrada, las variables que controlan el sistema circulan unidireccionalmente. (Carrillo, 2011, pp.15-30)

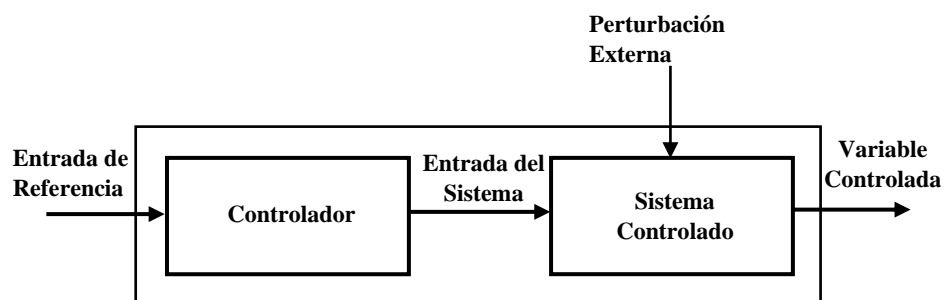


Figura 9-2. Sistema de control de lazo abierto.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

Para entender mejor un sistema de lazo abierto se puede citar como ejemplo el funcionamiento de un horno de microondas, en el cual la botonera de opciones permite fijar la señal de entrada en este caso el tiempo que el horno tendrá efecto sobre los alimentos y este sistema al terminar el

proceso se detendrá sin responsabilizarse por detectar si el alimento aún está frío ni tampoco intentará corregir el tiempo establecido.

2.7.2.2. Sistema de control a lazo cerrado

También denominado sistema de control retroalimentado, como su nombre lo indica el controlador del sistema es alimentado por la señal de error de desempeño, señal que representa la variación entre la señal de entrada y la señal de realimentación buscando así corregir el error causado por las perturbaciones al mínimo y llevar al sistema el valor requerido. Esta corrección se lleva a cabo mediante una acción de control que manipula alguna variable de entrada del sistema. (Carrillo, 2011, pp.15-30)

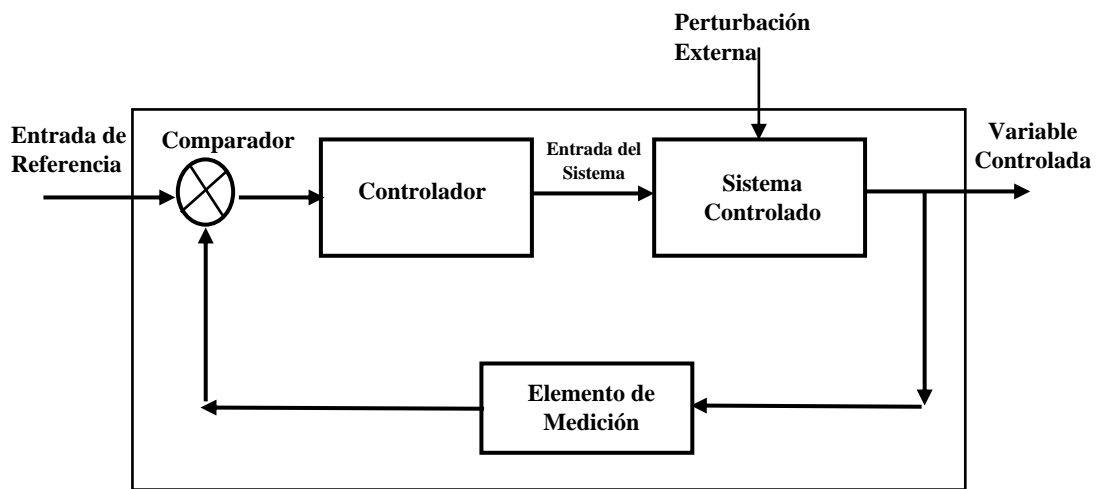


Figura 10-2. Sistema de control de lazo cerrado.

Fuente: (Benites, 2018)

2.8. Respuesta de un Sistema ante los distintos tipos de entradas.

Para entender el comportamiento de un sistema, es necesario partir desde la representación matemática del mismo, dicha representación será descrita en este sistema como su función de transferencia $G(s)$. Dicho sistema se caracteriza por proporcionar una respuesta consecuente a una señal de entrada.

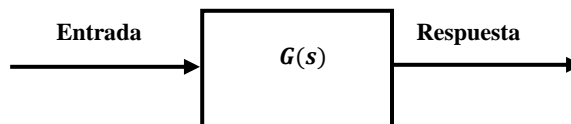


Figura 11-2. Esquema del comportamiento del Sistema.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

Existen distintas señales de entrada $r(t)$ con la capacidad de excitar un sistema, las más utilizadas son las funciones: impulso unidad, escalón unidad, rampa unidad y sinusoidal de amplitud unidad. La respuesta presentada en el sistema como consecuencia de las distintas señales de entrada posee un régimen transitorio y uno permanente, de lo cual depende la estabilidad del sistema.

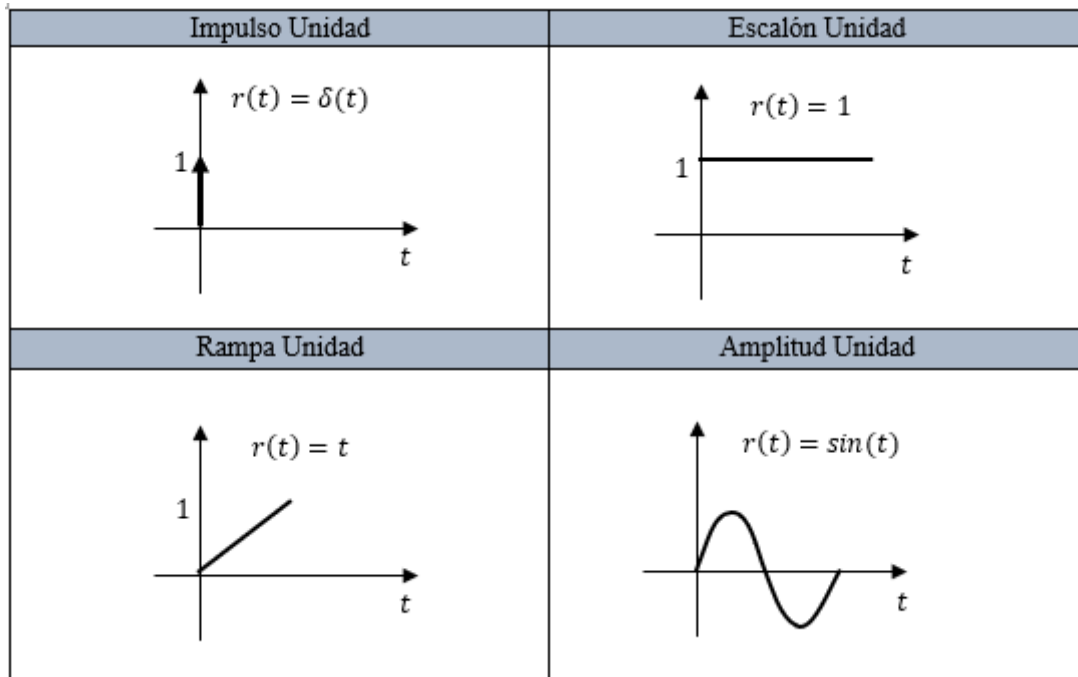


Figura 12-2. Tipos de entradas a los sistemas.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

2.9. Sistemas de Primer Orden

Generalmente, La función de transferencia $G(s)$ correspondiente a un sistema esta definida por una expresión racional de polinomios en función de s . Las raíces del denominador de dicho polinomio se denominan polos, y las raíces del numerador se denominan ceros. Cuando el sistema posee un único polo es definido como un Sistema de Primer Orden.

En la Figura 13-2 se esquematiza de manera general un Sistema de primer orden.

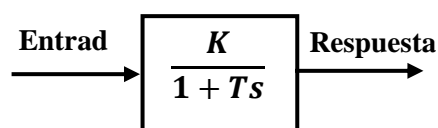


Figura 13-2. Sistema de primer Orden.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

Donde:

K : Constante denominada ganancia de estado estacionario del sistema

T : Constante de tiempo del sistema

Mediante transformadas de Laplace se obtiene la expresión de la salida como producto de una función de transferencia y una entrada, donde se necesita estimar la ganancia K y la constante de tiempo T

$$y(s) = \left[\frac{K}{(sT + 1)} \right] u(s)$$

2.9.1. Respuesta del Sistema de primer Orden ante una entrada Escalón.

Cuando el sistema de primer orden es estimulado por una entrada del tipo escalón unitario, esta cambia a partir de la convolución entre la entrada y el sistema.

$$y(t) = k \cdot (1 - e^{-t/T})$$

Adicionalmente se concluye que la constante T del sistema define la rapidez a la que el modelo actúa, por lo que:

$$t = T \qquad y(t = T) = k(1 - e^{-1}) = 0.632k$$

Y también se define al tiempo t_s como el tiempo necesario para que el sistema alcance su régimen permanente, sin embargo, no representa exactamente el valor final de la señal ya que, debido a que el sistema no alcanza nunca el valor de k , el tiempo correspondiente sería infinito. Debido a esta razón se suele aceptar un margen de error de 2% o 5% sobre el valor final, en este caso se analiza que el 5% del valor final corresponde a un valor de tres veces la constante de tiempo.

$$t = 3T \qquad y(t = 3T) = k(1 - e^{-3}) = 0.95k$$

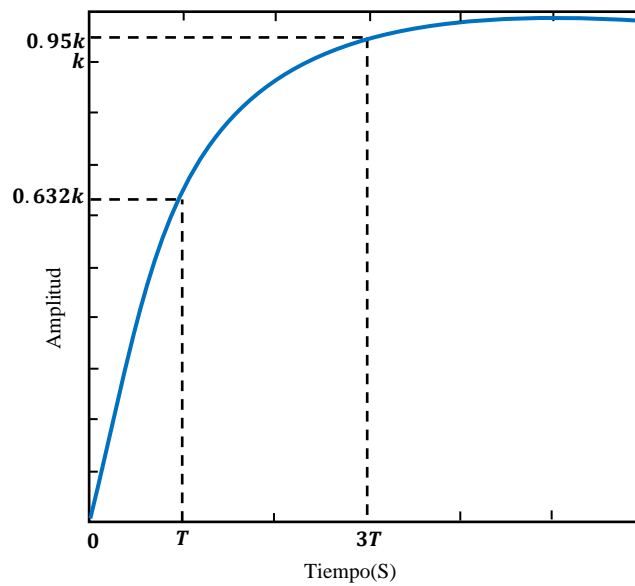


Figura 14-2. Respuesta al escalón unitario primer orden.
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

2.10. Sistemas de Segundo Orden.

De manera general se define que un sistema de segundo orden es aquel que posee dos polos. Estos sistemas suelen ser representados de la siguiente manera:

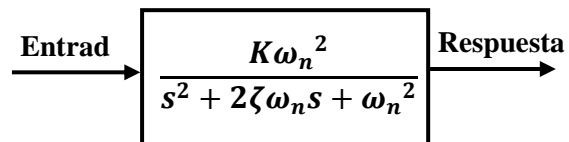


Figura 15-2. Sistema de segundo orden.
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

Donde, K es la ganancia del sistema en estado estacionario, ζ es el factor de amortiguamiento y ω_n es la frecuencia natural no amortiguada (frecuencia a la que el sistema seguirá vibrando, después de que se detiene la señal de excitación)

En la ecuación del sistema se puede apreciar entonces, que ω_n es admitida como velocidad angular constante y estará definida en rad/seg y su significado sería la distancia euclídea, entre el origen de coordenadas y los polos. Por otra parte ζ corresponde a un valor adimensional, si este

es mayor a 1 o 1 en valor absoluto, las raíces son reales, caso contrario, complejas y conjugadas. Hallando dichas raíces:

$$s_1, s_2 = \frac{-2\zeta\omega_n \pm \sqrt{(2\zeta\omega_n)^2 - 4\omega_n^2}}{2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$$

Donde, si $\zeta < 1$ las raíces serán complejas, con una componente real y una imaginaria conjugada; la primera se denominará constante de amortiguamiento σ y está ubicada en el eje real, y la segunda es la frecuencia de amortiguamiento ω_d , ubicada en el eje imaginario.

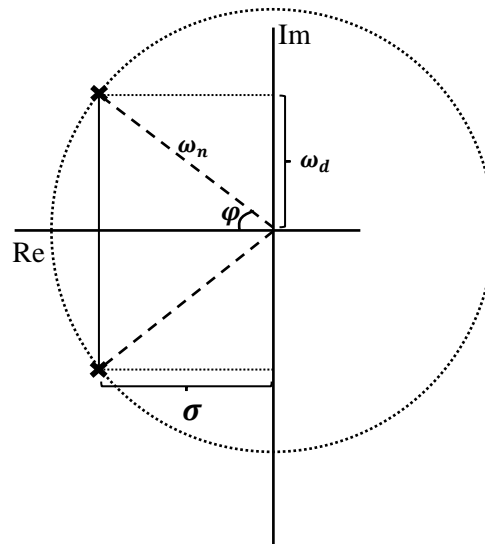


Figura 16-2. Parámetros que caracterizan el sistema y la ubicación de los polos.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

Donde se determina que:

$$\omega_n^2 = \sigma^2 + \omega_d^2$$

Y el ángulo de apertura de los polos complejos ϕ estará relacionada con el coeficiente de amortiguamiento ζ

$$\zeta = \cos\varphi$$

$$0 \leq |\zeta| \leq 1$$

El coeficiente de amortiguamiento ζ , es el que define que tipo de respuesta tendrá el sistema de segundo orden, se pueden plantear 3 casos principales:

- Sistema Sub-amortiguado. $0 \leq |\zeta| \leq 1$

Sistema en el cual ambos polos son soluciones complejas conjugadas. Su posición aparece en la siguiente ecuación

$$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{-\zeta^2} = -\sigma \pm j\omega_d$$

- Sistema críticamente amortiguado. $\zeta = 1$

En dicho Sistema el amortiguamiento es igual a uno y los polos son reales e iguales:

$$s_1, s_2 = -\omega_n$$

- Sistema Sobre amortiguado. $\zeta > 1$

El amortiguamiento en dicho Sistema supera el valor de uno y sus polos son reales y están localizados en:

$$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

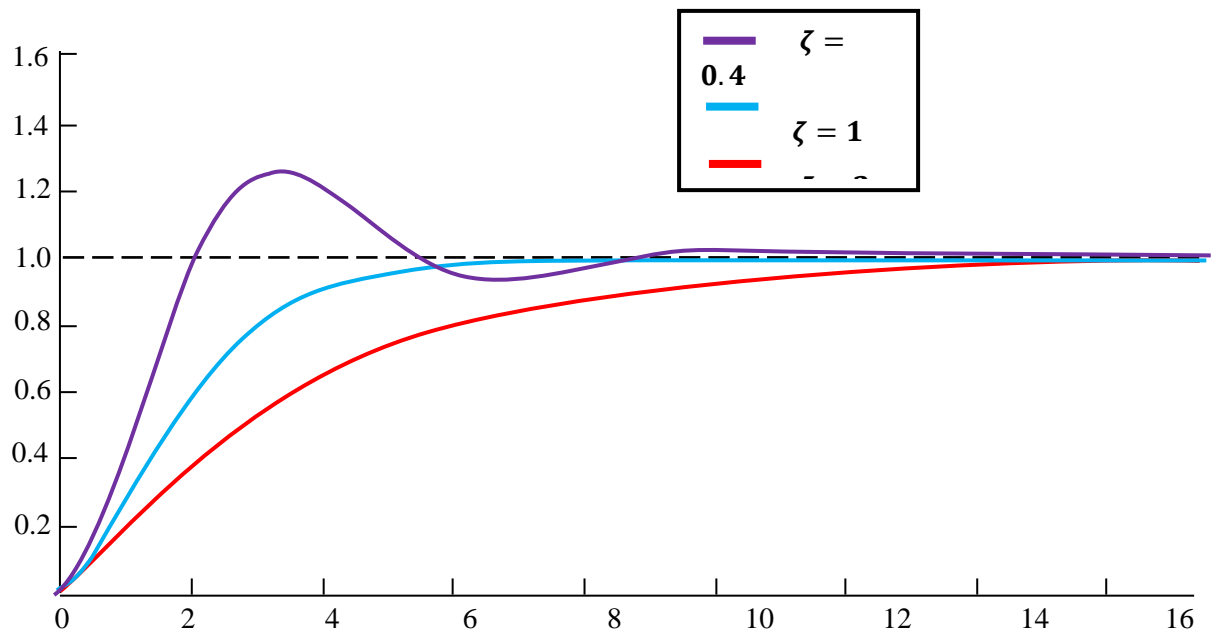


Figura 17-2. Sistemas de segundo orden con sus distintas variaciones de ζ .

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

2.10.1. Respuesta transitoria ante una entrada escalón caso sub-amortiguado.

Este caso se caracteriza por presentar sus polos complejos y conjugados, ubicados en el semiplano negativo del dominio complejo, que al ser estimulado por una entrada de tipo escalón unitario se obtiene:

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)s}$$

Aplicando fracciones parciales y Transformadas de Laplace a esta ecuación se obtiene:

$$G(t) = K \left(1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t + \varphi) \right) \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$$

Debido a que este modelo proporciona información acerca de la estabilidad y la naturaleza de la respuesta del régimen transitorio del sistema, es necesario caracterizarlo mediante medidas de tiempo y valores de pico.

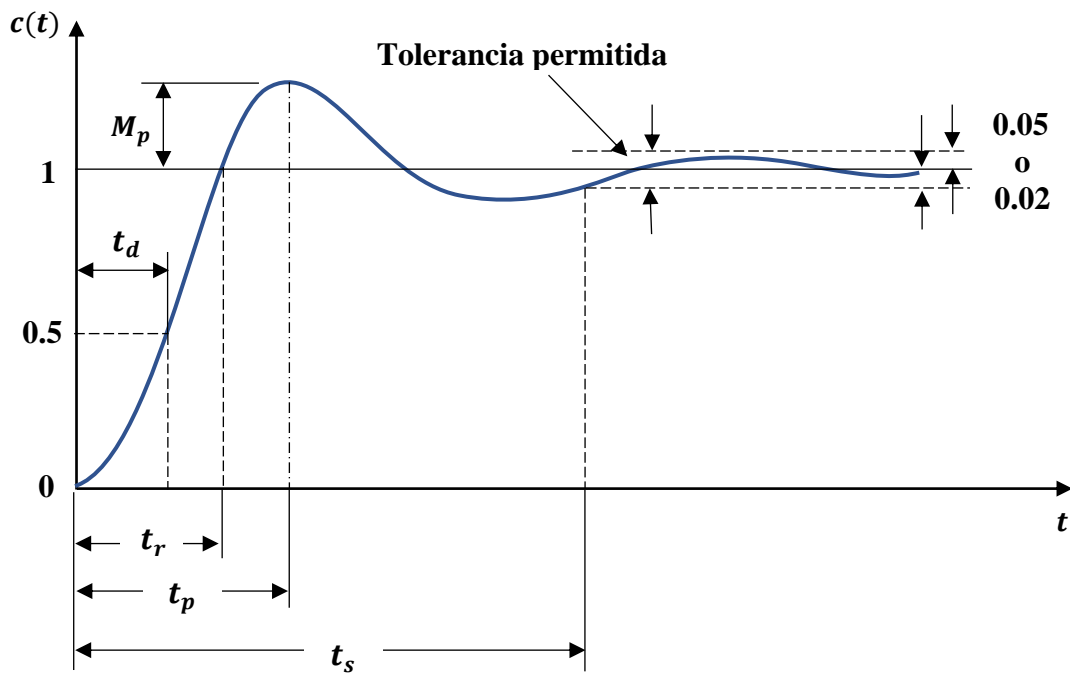


Figura 18-2. Respuesta de un sistema sub-amortiguado a una entrada escalón unitario.
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

2.10.1.1. Tiempo de establecimiento, T_s .

Es el tiempo que tarda el sistema de segundo orden en alcanzar el régimen permanente, con un margen de error aceptado del 2% o 5% del valor final, una vez se llega a ese porcentaje se puede asumir que se estableció en régimen permanente.

$$2\% \rightarrow t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n}$$

$$5\% \rightarrow t_s = \frac{3}{\zeta \omega_n}$$

2.10.1.2. Tiempo de pico, t_p

Es el intervalo de tiempo en la cual se produce la máxima amplitud de salida M_p , y se calcula a partir de la primera derivada de $g(t)$ e igualándola a 0

$$\dot{g}(t) = 0 \qquad \tan(\omega_d t_p + \varphi) = \frac{\omega_d}{\sigma} = \frac{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta \omega_n} = \tan \varphi$$

En donde se puede visualizar que los tiempos máximos y mínimos estarán validados por la coincidencia de φ vueltas enteras de π . La primera vuelta en radianes coincidirá con la amplitud máxima de salida, por lo que se concluye que:

$$\begin{aligned}\omega_d t_p &= \pi \\ t_p &= \frac{\pi}{\omega_d}\end{aligned}$$

2.10.1.3. Sobre-oscilación, M_p

Es el valor máximo de impulso en el cual la señal sobrepasa la referencia con relación al estado estacionario. El máximo sobre-impulso, puede medirse de la siguiente forma:

$$M_p = \frac{C(t_p) - C(\infty)}{C(\infty)0} = e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} = e^{-\frac{\sigma\pi}{\tan\varphi}}$$

$$M_{p[100\%]} = e^{-\frac{\sigma\pi}{\tan\varphi}} * 100\%$$

2.10.1.4. Tiempo de subida, t_r

Es el intervalo de tiempo que le toma al sistema pasar del 10% al 90% del valor final de la señal de salida, sin embargo, por fines de simplificación en la expresión matemática se asume que será el tiempo transcurrido en alcanzar por primera vez el 100% del valor final de la señal.

$$\frac{e^{-\sigma t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t_r + \varphi) = 0$$

$$\sin(\omega_d t_r + \varphi) = 0$$

$$\omega_d t_r + \varphi = \pi \quad \rightarrow \quad t_r = \frac{\pi - \varphi}{\omega_d}$$

2.11. Control PID

El control PID es un sistema de control a lazo cerrado (con retroalimentación) que permite controlar variables de un proceso tales como: temperatura, presión, velocidad, flujo, etc. Este tipo de control es uno de los más utilizados a nivel industrial debido a la gran flexibilidad que posee, tanto en el algoritmo de control como en el tratamiento de la señal de referencia. (Villalba, 2011, p.24-38)

El control PID se basa en corregir la desviación entre el valor medido y el valor requerido, calculándola y luego produciendo una acción de corrección que procede a reformar el proceso.

Para que el control PID regule correctamente el proceso o sistema propuesto, se requiere al menos:

- **Un sensor**, dispositivo el cual detecta el estado del sistema (termopar, manómetro, termistor, etc.)
- **Un controlador**, que emite la señal que dirige al actuador.
- **Un actuador**, que de manera controlada modifica el sistema (motor, resistencia eléctrica, válvulas, etc.). (Villalba, 2011, p.24-38)

2.11.1. Componentes de un control PID

El control PID está formado por 3 componentes que son: Parte Proporcional, Acción Integral y Acción Derivativa, y cada una de ellas aporta en la suma final que pretende que el bucle de control rectifique con eficacia y en el menor tiempo posible los efectos de las perturbaciones, aporte que viene dado como constante proporcional, tiempo integral y tiempo derivativo respectivamente. (Martínez, 2018, p.20-26)

El esquema básico en el que se representa el control PID se muestra en la Figura 19-2.

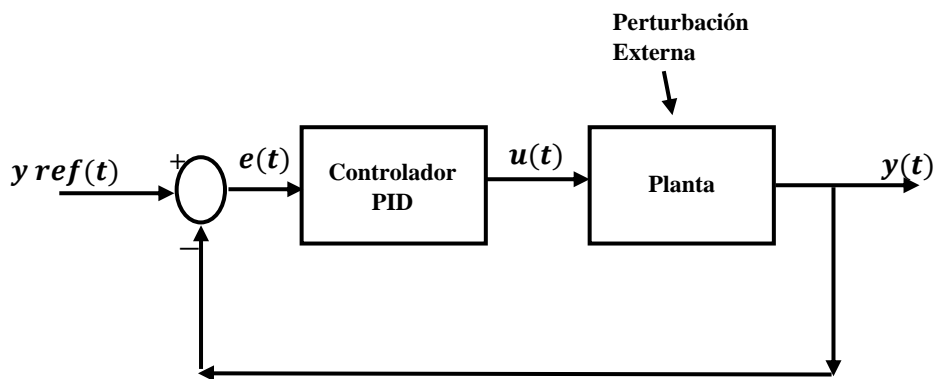


Figura 19-2. Esquema de un control PID.

Fuente: (Martínez, 2018)

2.11.2. Control Proporcional

La parte proporcional está determinada por el producto entre la señal de error y la constante proporcional, intentando reducir el error estacionario hasta que este sea casi nulo. Es llamado así debido a q el control se básicamente proporcional al error y responde inmediatamente cuando se produce el error. Este control no considera el tiempo, por lo que para solucionar permanentemente el error e introducir una componente que tome en cuenta la variación respecto al tiempo es necesario introducir las acciones integrales y derivativas. (Villalba, 2011, p.24-38)

La fórmula del control proporcional está desarrollada por:

$$u(t) = k_p e(t)$$

Donde:

$u(t)$: Señal de control

k_p : Ganancia proporcional

$e(t)$: Error

2.11.3. Acción Integral

El control integral busca reducir y eliminar el error en estado estacionario originado en el control proporcional, es decir que la variable de salida de la planta sea igual que la de referencia, esto se consigue acumulando el error existente a través del tiempo, lo que aumenta la acción integral hasta que la magnitud de control cause efecto en la planta y el error llegue a cero. El error es integrado, lo que significa que es promediado o sumado por un periodo determinado de tiempo y posteriormente multiplicado por una constante k_i que representa la constante de integración. Finalmente, la respuesta del control integral se adiciona al control proporcional para formar el control P + I que se espera mantenga al sistema estable eliminando el error estacionario. (Villalba, 2011, p.24-38)

La fórmula de la parte integral viene dada así:

$$u(t) = k_i \int_0^t e(t) dt$$

Donde:

$u(t)$: Señal de control

k_i : Ganancia integral

$e(t)$: Error

2.11.4. Acción Derivativa

La acción derivativa solo se presenta cuando hay una alteración en el valor absoluto del error, ya que si el error es constante solamente actuaran los controles proporcional e integral.

La función principal del modo derivativo es la de optimizar la respuesta del lazo cerrado, ejecutándose instantáneamente cuando el error se produce sin permitir que este se llegue a alcanzar un valor considerable, en términos sencillos se puede entender como que esta acción predice el error, de este modo es capaz de proporcionar una acción correctiva antes de que ocurra en realidad el error. Este tipo de controlador no se utiliza individualmente, sino siempre de forma conjunta con las formas de control proporcional y/o derivativa, debido a que este es insensible a señales de error constantes o que varían de forma gradual o lenta. (Martínez, 2018, p.20-26)

La fórmula de la acción derivativa está dada por:

$$u(t) = k_d \frac{d e(t)}{dt}$$

Donde:

$u(t)$: Señal de control

k_d : Ganancia integral

$e(t)$: Error

Agrupando todos estos conceptos se puede acoplar la parte proporcional. Integral y derivativa en un solo circuito y obtener el controlador PID, intentando así corregir las múltiples formas de error en los sistemas y controlar a la planta de la forma más óptima y rápida posible.

La ley de control en el tiempo $u(t)$ que unifica los sistemas de control, está definida por:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{d e(t)}{dt}$$

2.12. Sintonización del controlador PID

Se conoce como sintonía del controlador al proceso de selección de parámetros en el controlador para que este cumpla con las especificaciones de comportamiento establecidas inicialmente, esto implica dar valores a k_p , T_i y T_d .

Dado el sistema de control PID de una planta. Si es posible deducir un modelo matemático que gobierne dicha planta, se puede utilizar diversas técnicas de diseño con el propósito de determinar

los parámetros del controlador que obedezca las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema de lazo cerrado. Por otro lado, Si el modelo matemático que rige la planta es demasiado complicado de obtener, no será factible diseñar el control PID mediante métodos analíticos. En dicho caso se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía del controlador PID. Estos métodos experimentales están basados en técnicas heurísticas (prueba y error) o métodos sistemáticos, dentro de los cuales destaca el método sistemático clásico presentado por Ziegler y Nichols. (1942) (Ogata, 2010)

2.13. Programación en Python

Python es un lenguaje de programación (scripting) de alto nivel multiplataforma orientado a objetos, capaz de realizar cualquier tipo de programas, como aplicaciones en Windows, servidores de red, páginas web, etc. Python es un lenguaje interpretado, es decir, primero son compiladas las instrucciones de alto nivel al lenguaje de ensamblador propias de Python y luego en tiempo de ejecución mientras el usuario está ejecutando el programa estas son interpretadas en un programa escrito en lenguaje C, esto ofrece una mayor rapidez de desarrollo y reducción de inconvenientes existentes en otros lenguajes. (Celi, 2013, p.28-31)

En los últimos años Python ha alcanzado gran popularidad debido a razones como:

- Amplia variedad de librerías utilizables incorporadas en el propio lenguaje evitando así la necesidad de programarlas de cero.
- Sencillez y velocidad permitiendo programar en menos líneas que su equivalente en JAVA o C
- Múltiples plataformas compatibles como Unix, Windows, Mac, OS/2, etc.
- Totalmente gratuito, incluso con propósitos empresariales. (Celi, 2013, p.28-31)

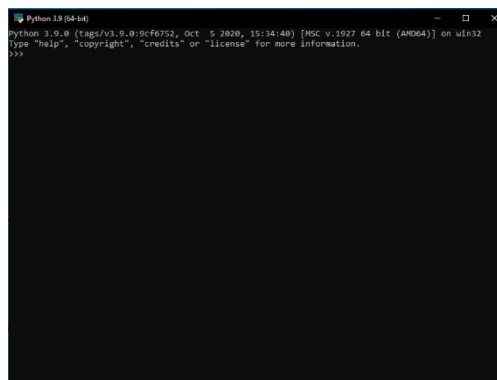


Figura 20-2. Software Python 3.9
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

CAPÍTULO III.

3. MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se desarrolla la casa de la calidad, se presentan las diferentes alternativas de diseño con la evaluación de sus criterios, se selecciona los elementos para la construcción del banco de instrumentación mediante los cálculos de Potencia necesaria; se presentan todas las características de los elementos electrónicos y eléctricos que componen el tablero de control, de la misma manera se detalla las entradas y salidas de los circuitos eléctricos y electrónicos. En esta sección, también se explica la implementación del software Python y Arduino para el desarrollo de la interfaz del banco, se indica la función de las pantallas de la interfaz con sus respectivas programaciones gráficas; Concluyendo con la especificación de los tiempos de construcción y montaje del banco, detalle de los manuales de operación y mantenimiento del equipo, además del análisis de costos del banco.

3.1. Especificaciones Técnicas del Banco Didáctico

Es necesario reconocer las funciones principales y secundarias del banco didáctico, comprendiendo como funciones principales a la interacción del estudiante con los dispositivos de medición de temperatura en este caso los termopares y el control automático del horno, mientras que las funciones secundarias facilitan el cumplimiento satisfactorio de las primeras, para obtener un diseño modular del banco y facilitar aspectos como el diseño, la reducción de costos, el mantenimiento y por último la construcción.

3.2. La Casa de la Calidad

La casa de la calidad es una herramienta útil para garantizar un buen diseño en la elaboración de un equipo, este diagrama relaciona las necesidades del usuario y el cómo se cumplen para su satisfacción. (ALCÁZAR et al., 2017, p.1); a continuación, se identifica la voz del usuario y sus respectivos requerimientos.

3.2.1. Voz del usuario

El banco didáctico desde la perspectiva del usuario, debe cumplir con lo siguiente:

- Que tenga operación eléctrica
- Que sea eficiente (Temperatura de trabajo y control)
- Que tenga una fácil operación
- Que sea compacto
- Que tenga un precio accesible
- Que sea de un mantenimiento sencillo
- Que sea seguro
- Que sea estético

3.2.2. Voz del Ingeniero

Una vez que, se han determinado las necesidades del usuario, se establece las cualidades técnicas, así:

- Potencia Eléctrica
- Temperatura máxima de trabajo
- Tiempo de trabajo reducido
- Panel de control
- Ensamblaje
- Costo Materiales
- Automatización
- Alta Confiabilidad
- Interfaz amigable

El desarrollo de la casa de la calidad se muestra en la Figura 1-3.

3.3. Análisis de la estructura funcional

Una vez identificadas todas las funciones del equipo, estas pueden separarse por niveles a través de un diagrama de bloques, estableciendo que el nivel más bajo es la función global del banco didáctico, mientras que los siguientes niveles son todas las subfunciones que abarca la global para cumplir su objetivo, en cada uno de estos bloques se especifica las señales de entrada y de salida, mismas que pueden ser de diferentes tipos como: material, señal y energía, estableciendo en sí todo el diseño conceptual.

3.3.1. Nivel 0

En este nivel se describe la función global del banco didáctico, dicha función es calibrar los tipos de termopares J, K & T, y controlar un horno de tres etapas, para esto se coloca el termopar sin calibrar en el horno, y con la aplicación de energía eléctrica con señales específicas por el operador, el equipo entregará el dispositivo calibrado, esto se representa en el diagrama de la Figura 2-3.

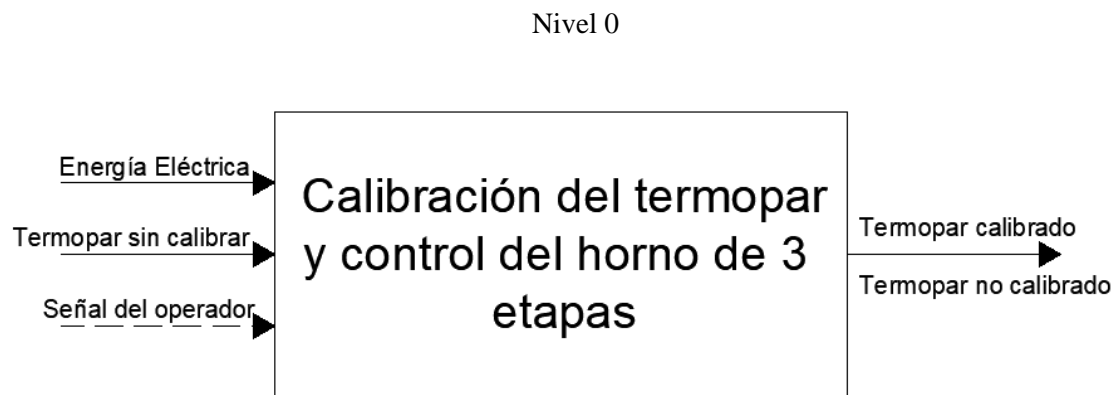


Figura 2-3. Diagrama de la función principal del banco didáctico.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.3.2. Nivel 1

En este nivel se detallan las subfunciones que se aplican en el equipo, para conseguir un termopar calibrado y un control óptimo del horno, se inicia con la colocación del tipo de termopar J, K o T en su etapa correspondiente, luego al suministrar energía eléctrica con señales determinadas por

el operador se controla la temperatura para la toma de datos, con el fin de calibrar el termopar correspondiente. El diagrama de este nivel está representado en la Figura 3-3.

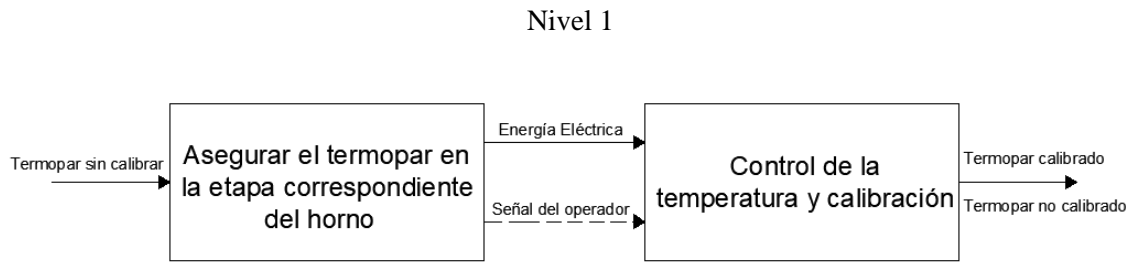


Figura 3-3. Diseño conceptual nivel 1.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.3.3. Nivel 2

En este último nivel se distribuyen todas las subfunciones del banco didáctico. Inicialmente, se suministra de energía eléctrica al equipo, seguido se accede a la interfaz de comunicación y se coloca el termopar en la etapa correspondiente J, K o T, luego con una señal se enciende el horno para comenzar la toma de datos, obteniendo la ecuación del termopar patrón y los valores necesarios para estabilizar la temperatura del horno mediante un control, finalmente se guardan los datos y se cierra la interfaz de comunicación.

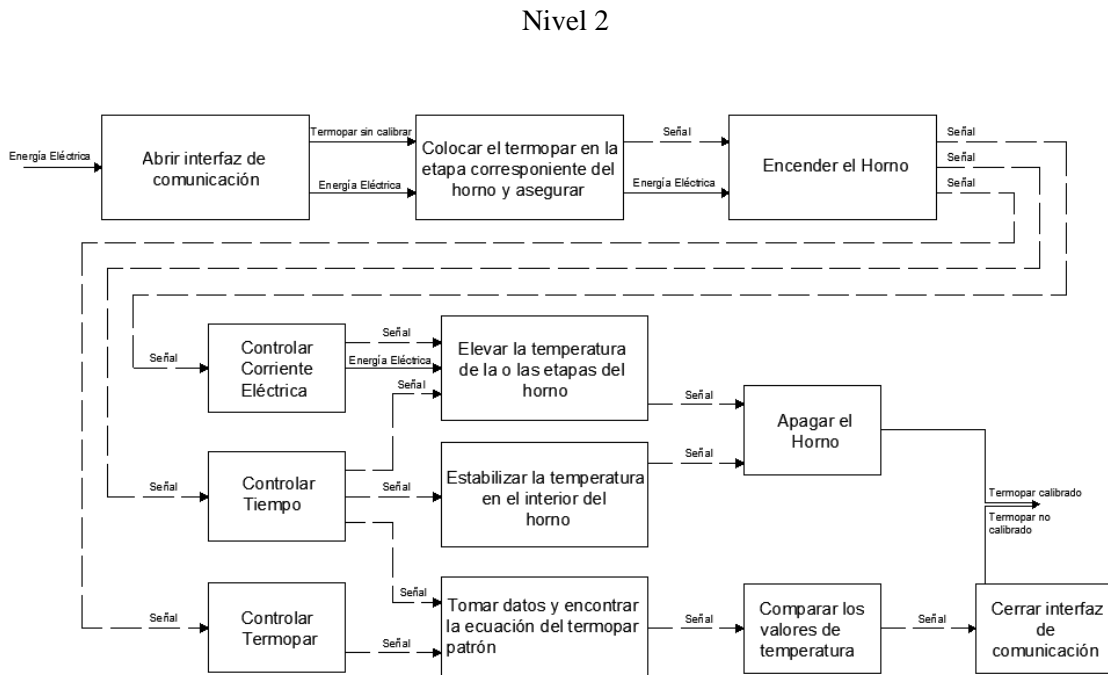


Figura 4-3. Diseño conceptual nivel 2.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.4. Módulos

El desarrollo de módulos ayuda a distribuir el equipo en diferentes bloques funcionales para facilitar su construcción. Los módulos que se obtuvieron mediante el diseño conceptual son:

- Módulo 1: El horno.
- Módulo 2: Automatización y Control del banco didáctico.

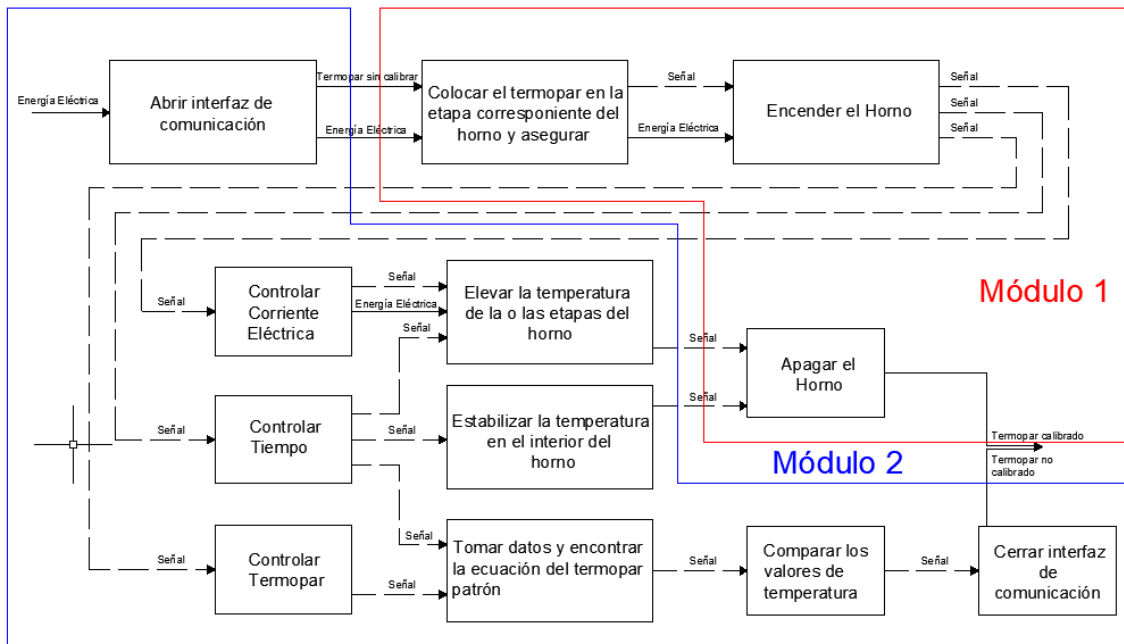


Figura 5-3. Módulos del banco didáctico de calibración.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.4.1. Desarrollo de las diferentes alternativas para cada módulo.

Se analizarán las alternativas de solución para cada módulo, teniendo en cuenta cada una de sus ventajas y desventajas.

3.4.1.1. Módulo 1: El horno

El banco requiere de una fuente de trabajo de tipo térmico, se optó por la construcción de un horno eléctrico, con las siguientes consideraciones:

- Cámaras de calentamiento.
- Resistencias para el calentamiento.

3.4.1.2. Módulo 2: Automatización y Control del banco didáctico

Esta es la función más importante del banco, pues es la interacción directa del equipo con el usuario, en la que interviene directamente el análisis de la correcta selección de los dispositivos en los siguientes campos:

- Los modelos de las termocuplas.
- El microprocesador adecuado para el sistema

3.5. Módulo 1: El horno

3.5.1. Cámaras de calentamiento.

El modelo del horno va a influir en la toma de datos en el equipo por lo que se debe seleccionar la alternativa más viable de las propuestas que se presentan a continuación.

3.5.1.1. Alternativa 1

En esta propuesta se tiene un horno de tres cámaras con tamaños considerables y cada una de las etapas tienen su puerta correspondiente.

Ventajas

- Llega con facilidad a temperaturas de hasta 550°C.
- Tiene una capacidad de gran volumen.
- Tiene un aislamiento multicapa.
- Soporte resistencias blindadas.

Desventajas

- Es muy costoso.
- No es compacto.
- Entrada y salida de aire.



Figura 6-3. Primer diseño para el modelo del horno.

Fuente: (Direct Industry, 2020)

3.5.1.2. Alternativa 2

La segunda alternativa es un horno con etapas pequeñas donde la resistencia se encuentra encapsulada en cilindros individuales que rodearan los termopares.

Ventajas

- Llega a temperaturas mayores a 500°C.
- El costo es muy reducido.
- Soporta resistencias blindadas.

Desventajas

- No es muy exacto, ya que no tiene una buena relación entre mantener y disipar el calor.

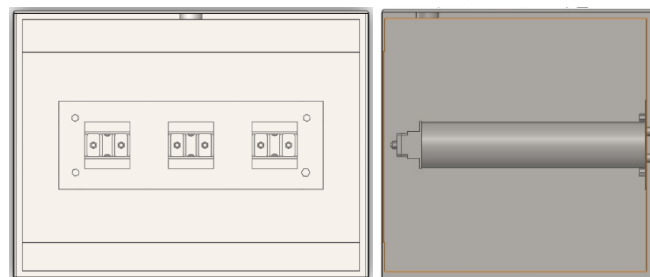


Figura 7-3. Segundo diseño para el modelo del horno.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.5.1.3. Alternativa 3

Este último modelo es la mejor alternativa por su alta eficiencia para la calibración de termocuplas, se trata de un horno de bloque de estado sólido.

Ventajas

- Poseen calibración automática.
- Llegan a temperatura de hasta 1200°C.
- Es compacto.
- Acepta cualquier modelo de termocuplas.
- Microprocesador propio especializado en calibración.

Desventajas

- Su precio supera los 8000 dólares.



Figura 8-3. Tercer diseño para el modelo del horno.

Fuente: (Allied, 2020)

3.5.2. El tipo de resistencias eléctricas a utilizar.

En el uso de hornos eléctricos existen diferentes resistencias ya explicadas en el capítulo 2, con lo cual se puede considerar diferentes alternativas de solución para este módulo.

3.5.2.1. Alternativa 1

Resistencias metálicas, en esta alternativa se presenta una resistencia de aleación Ni-Cr.

Ventajas:

- Son utilizadas para el calentamiento de gases y aire.
- Se construyen en cualquier forma, tensión y potencia dependiendo de la necesidad.
- Son muy utilizadas en hornos, secadores, evaporadores, etc.

Desventajas:

- Requieren de un consumo energético muy alto por lo que se refleja en el costo del consumo de energía eléctrica.



Figura 9-3. Resistencia eléctrica metálica.

Fuente: (Resistencias Tope S.A., 2020)

3.5.2.2. Alternativa 2

Resistencias no Metálicas, en esta segunda solución se presenta un electrodo de varilla de grafito negro.

Ventajas:

- Resistentes a altas temperaturas.
- Fuerte resistencia al choque térmico.
- Se utiliza para la metalurgia.
- Buena conductividad eléctrica.

Desventajas:

- Se desgastan por el uso prolongado.
- Tienen un costo alto.



Figura 10-3. Electrodo de Grafito.

Fuente: (Cometal, 2020)

3.5.2.3. Alternativa 3

Resistencias blindadas con cuarzo.

Ventajas:

- Son utilizadas en procesos donde requieren una calefacción rápida.
- Se utilizan en hornos domésticos, secadores, etc.
- Llegan a temperaturas mayores a 1000°C.

Desventajas:

- Son muy frágiles en su manipulación, por lo que se debe tener mucho cuidado el momento de su colocación.



Figura 11-3. Resistencia de cuarzo.

Fuente: (Techno Injection & Tools S. A. de C. V., 2020)

3.6. Módulo 2: Automatización y control del banco didáctico

3.6.1. Modelo de los termopares

Existen distintos modelos de termopares que se utilizan en muchos ámbitos de la industria, a continuación, se explican algunas alternativas posibles de solución para el módulo presente.

3.6.1.1. Alternativa 1

La termocupla está conformada por un resorte y un adaptador en forma de bayoneta, adecuada para medir la temperatura en solidos como: herramientas y cojinetes de contacto corredizo, es una de las más utilizadas en la industria de plásticos e industrias en general.

Ventajas:

- Su cable puede ser fabricado de distintos materiales dependiendo a la necesidad de su aplicación.
- Se pueden fabricar en diversos tipos de termocuplas como, J, K, T, y E.

Desventajas:

- Tienen un precio relativamente alto con respecto a los otros modelos.

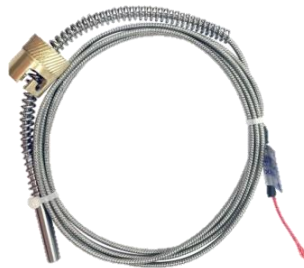


Figura 12-3. Termocupla modelo bayoneta.

Fuente: (Termocuplas control industrial, 2020)

3.6.1.2. Alternativa 2

La termocupla con racor de conexión es la mejor alternativa para aplicaciones en laboratorios, ya que presenta gran estabilidad en su instalación y tiene resistencia a las vibraciones.

Ventajas:

- Presentan bulbos de acero inoxidable que pueden llegar hasta temperaturas de 1150°C.
- Son compatibles para la fabricación de diferentes tipos como J, K, T, E, N, R, S, B, RTD, PT50, PT100.
- Se fabrican con rosca de acuerdo al proceso que va a ser utilizado.

Desventajas:

- Necesitan de un buen soporte de instalación en la aplicación a ser utilizados.



Figura 13-3. Termocupla con racor de conexión.

Fuente: (Termocuplas control industrial, 2020)

3.6.1.3. Alternativa 3

La termocupla modelo punzón es más utilizada en la industria alimenticia.

Ventajas:

- Pueden fabricarse diferentes tipos de termocuplas como J, K, T y E.
- El cable de extensión posee recubrimientos de PVC o acero INOX.

Desventajas:

- Por presentar un modelo simple sus aplicaciones son muy limitadas.



Figura 14-3. Termocupla modelo punzón.

Fuente: (Termocuplas control industrial, 2020)

3.6.2. Microprocesador adecuado para el sistema.

Por la variedad de microprocesadores que existen en la actualidad se ha optado por presentar 3 opciones que serían la posible solución para este ítem.

3.6.2.1. Alternativa 1

Arduino quizá es el microprocesador más utilizado en la industria para la creación de prototipos por su bajo costo y su fácil desarrollo, además de poseer software libre.

Ventajas:

- Su costo es muy bajo a comparación de otros microprocesadores.
- Tiene una programación simple.
- Es Multi-plataforma es decir funciona en diferentes sistemas operativos como Windows, Linux y Macintosh OSX.

Desventajas:

- Requiere de un ordenador para su ejecución.
- Posee pines de entrada y salida limitados.



Figura 15-3. Microprocesador Arduino.

Fuente: (Loureiro y Pujol, 2017)

3.6.2.2. Alternativa 2

Raspberry Pi B+ es un pequeño ordenador con la característica de poseer puertos GPIO en el que fácilmente se puede conectar un monitor y programar sin la necesidad de un ordenador, su software es totalmente libre desde la página oficial.

Ventajas:

- Tiene un precio muy accesible.
- Tiene una comunicación inalámbrica con ordenadores.
- Tiene una programación amigable.

Desventajas:

- No tiene memoria integrada por lo que depende de una tarjeta micro SD



Figura 16-3. Microprocesador Raspberry Pi B+.

Fuente: (Suárez, 2020)

3.6.2.3. Alternativa 3

Lo PIC's son netamente diseñados para la automatización industrial, en los que implique la regulación de múltiples variables físicas como el control de muchos componentes.

Ventajas:

- Reducción de costos de mano de obra.
- Instalación sencilla.
- Tiene una alta capacidad de procesamiento, y la posibilidad de manejar múltiples sensores.
- Tiene una alta precisión en su automatización.

Desventajas:

- Tiene un precio muy alto.
- Se requiere de personal calificado para el empleo de este dispositivo.




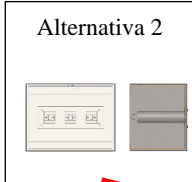






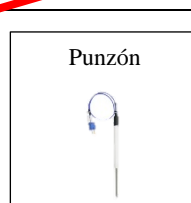
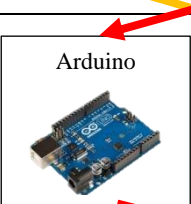
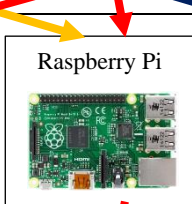
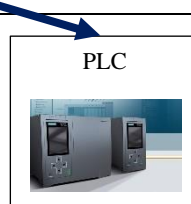
Figura 17-3. PLC Simatic S7-1500.

Fuente: (infoPLC, 2020)

3.7. Elección de las alternativas de solución de cada módulo.

Para llegar a una solución favorable en el resultado final del banco didáctico, se analiza la combinación de las alternativas individuales presentadas anteriormente de cada módulo. En este resultado final se deben cumplir todas las prioridades consideradas en el desarrollo de la casa de la calidad para el diseño y dimensionamiento en el equipo, garantizando que la eficiencia en el diseño establecido es la más óptima.

Tabla 1-3. Tabla de formulación de soluciones.

Función.		Alternativas.		
Fuente de energía (Horno).	Cámaras de calentamiento	Alternativa 1 	Alternativa 2 	Alternativa 3 
	Resistencias para el calentamiento	Resistencias Metálicas 	Resistencias no Metálicas 	Resistencias de cuarzo 
Automatización y Control del banco didáctico	Modelos de las termocuplas	Bayoneta 	Racor de conexión 	Punzón 
	Microprocesador	Arduino 	Raspberry Pi 	PLC 
Soluciones		Solución 1	Solución 2	Solución 3

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.7.1. Soluciones para cada módulo

A partir de la Tabla 1-3 se han seleccionado tres posibles soluciones que cumplen con el diseño conceptual del banco didáctico. Con el fin de escoger los componentes más apropiados para la construcción del banco se analiza cada resultado con el método ordinal corregido de criterios ponderados. Las soluciones que se evalúan con este método se describen a continuación:

Tabla 2-3. Soluciones para el diseño conceptual del banco didáctico.

Módulos	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Cámara de Calentamiento	Horno de 3 etapas, con cámaras rectangulares	Horno de 3 etapas, con cámaras encapsuladas	Horno de estado sólido
Resistencias para el calentamiento	Resistencias Metálicas	Resistencias de cuarzo	Propio
Modelo de la termocupla	Bayoneta	Con racor de conexión	Con racor de conexión
Microprocesador	Raspberry Pi	Raspberry Pi y Arduino	PLC

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.7.2. Valuación de los criterios de solución.

Los criterios más relevantes a considerar en el diseño son los siguientes:

- Automatización eficaz
- Panel de control
- Costo
- Interfaz simple e intuitiva

La valoración del método de Criterios Ponderados se realiza en la Tabla 3-3, dónde cada criterio se compara con los criterios restantes, considerando:

- Si el criterio de las filas (a) es superior al de las columnas (b) se valora con **1**
- Si el criterio de las filas (a) es equivalente al de las columnas (b) se valora con **0.5**
- Si el criterio de las filas (a) es inferior al de las columnas (b) se valora con **0** (Riba, 2002, p.59-62)

Una vez asignados los valores de criterio correspondientes, estos se suman y a este resultado se le añade una unidad, para evitar que algún criterio sea nulo. En la última columna se presenta los valores ponderados. (Riba, 2002, p.59-62)

Tabla 3-3. Valoración de cada criterio con los criterios restantes.

Criterio a \ Criterio b	Automatización eficaz	Facilidad de construcción	Costo	Interfaz simple e intuitiva	$\Sigma+1$	Ponderación
Automatización eficaz		1	0,5	0,5	3	0,29
Panel con múltiple interfaz de control	0		0,5	0	1,5	0,14
Costo	0,5	0,5		0,5	2,5	0,24
Interfaz simple e intuitiva	1	1	0,5		3,5	0,33
SUMA					10,5	1
Interfaz > Automatización > Costo > Panel						

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Mediante la evaluación de los criterios ponderados, se concluye que el criterio de mayor importancia en el banco didáctico es que, presente una interfaz simple e intuitiva, seguida de una automatización eficaz, que el costo de construcción sea accesible, y por último que su panel presente múltiple interfaz de control.

En función a estos criterios, en la Tabla 4-3 se evalúa cada alternativa de solución. Para esta evaluación se usan valores del 1 al 3, considerando como bajo a 1 y a 3 como lo más alto.

Tabla 4-3. Evaluación de las alternativas de solución para cada criterio.

Solución	Interfaz simple e intuitiva	Automatización eficaz	Costo	Panel con múltiple interfaz de control
Solución 1	2	1	2	1
Solución 2	3	2	2	2
Solución 3	3	3	3	2

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Después, se evalúan las alternativas de solución para cada uno de los criterios establecidos, utilizando la siguiente valoración, los resultados se presentan en las Tablas 5-3, 6-3, 7-3 y 8-3.

- Si la solución de las filas (a) es superior al de las columnas (b) se valora con **1**
- Si la solución de las filas (a) es equivalente al de las columnas (b) se valora con **0.5**
- Si la solución de las filas (a) es inferior al de las columnas (b) se valora con **0** (Riba, 2002, p.59-62)

Una vez asignados los valores de solución correspondientes, estos se suman y a este resultado se le añade una unidad, para evitar que algún criterio sea nulo. En la última columna se presenta los valores ponderados. (Riba, 2002, p.59-62)

En la Tabla 5-3, se evalúa el criterio de presentar una Interfaz simple e intuitiva entre las alternativas de solución.

Tabla 5-3. Evaluación de las soluciones en relación al criterio Interfaz simple e intuitiva.

Solución a \ Solución b	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0	1	0,17
Solución 2	1		0,5	2,5	0,42
Solución 3	1	0,5		2,5	0,42
Suma				6	1,00

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

A continuación, en la Tabla 6-3, se utiliza la valoración de criterio ponderados (1; 0,5; 0), para comparar las alternativas de soluciones con el criterio de Automatización eficaz.

Tabla 6-3. Evaluación de las soluciones en relación al criterio Automatización eficaz.

Solución a \ Solución b	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0	1	0,17
Solución 2	1		0	2	0,33
Solución 3	1	1		3	0,50
Suma				6	1,00

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Utilizamos la misma valoración, para comparar las alternativas de solución con el criterio relacionado al Costo, los resultados se presentan en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3. Evaluación de las soluciones en relación al criterio Costo.

Solución a \ Solución b	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1	2,5	0,42
Solución 2	0,5		1	2,5	0,42
Solución 3	0	0		1	0,17
Suma				6	1,00

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

En la Tabla 8-3, se evalúa el criterio correspondiente al Panel de control, con la misma valoración de criterios ponderados.

Tabla 8-3. Evaluación de las soluciones en relación al criterio Panel de control.

Solución a \ Solución b	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0	1	0,17
Solución 2	1		0,5	2,5	0,42
Solución 3	1	0,5		2,5	0,42
Suma				6	1,00

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Por último, se realiza la matriz de solución final, partiendo de los resultados obtenidos en la evaluación de las alternativas de solución de cada criterio. Esta solución final se obtiene de la sumatoria de los productos de las evaluaciones del criterio (Tabla 3-3), por la valoración de cada solución a un criterio respectivo (Tablas 5-3, 6-3, 7-3 y 8-3), los resultados se presentan en la Tabla 9-3.

Tabla 9-3. Matriz de solución final del banco didáctico.

Solución	Interfaz simple e intuitiva	Automatización eficaz	Costo	Panel con múltiple interfaz de control	Σ	Prioridad
Solución 1	0,33*0,17	0,29*0,17	0,24*0,42	0,14*0,17	0,2262	3
Solución 2	0,33*0,42	0,29*0,33	0,24*0,42	0,14*0,42	0,3929	1
Solución 3	0,33*0,42	0,29*0,5	0,24*0,17	0,14*0,42	0,3810	2
Solución 2 > Solución 3 > Solución 1						

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 9-3, la opción que presenta una excelente interfaz, una automatización sumamente eficaz, de un costo muy accesible y con un panel de control amplio es la solución 2, la cual consiste de un horno eléctrico de 3 etapas con cámaras encapsuladas, con resistencias de cuarzo para el calentamiento, posee termocuplas con racor de conexión para la toma de datos y dispone de dos microprocesadores Arduino nano y Raspberry Pi para la automatización y control.

3.8. Diseño a detalle del banco didáctico.

El modelo del banco didáctico ha sido realizado en el software “SolidWorks” y consta de 3 módulos:

- Tablero de control.
- Horno.
- Estructura de soporte.

El tablero se realizó utilizando la herramienta de chapa metálica y se dimensionó en base a los estándares de tableros existentes en el mercado.

El módulo del horno está formado de dos partes: la primera, correspondiente a la carcasa del horno realizada mediante las herramientas: chapa metálica y piezas soldadas; la segunda, conformada por tres etapas cilíndricas que rodean las resistencias eléctricas sujetas a la pared frontal del horno mediante pernos.

En las Figuras 18-3 y 19-3 se observan el diseño y dimensiones del armazón.

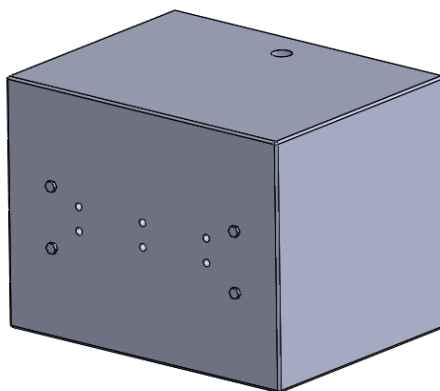


Figura 18-3. Armazón del horno.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

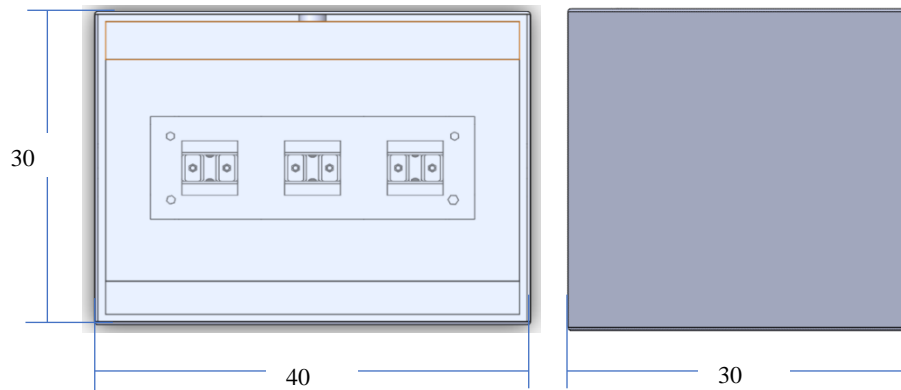


Figura 19-3. Dimensiones del armazón del horno.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

La estructura de soporte fue realizada por un croquis 3D, asumiendo una disposición vertical para garantizar un diseño compacto. Se utilizó la herramienta miembro estructural y se seleccionó un perfil L; Las uniones se consideraron como soldadas.

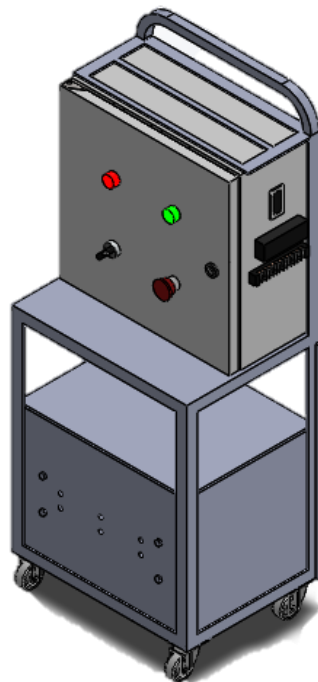


Figura 20-3. Modelado del prototipo del banco didáctico.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.9. Selección del material.

El material para la construcción del horno, se selecciona mediante el programa CES EduPack, este software es esencial en ingeniería, debido a la gigantesca base de datos de materiales que contiene, brindando herramientas para una óptima selección. Los parámetros y restricciones considerados son los siguientes:

- Material metálico ($E > 100\text{GPa}$, módulos de materiales metálicos).
- Dúctil (5-20% de elongación, fácil maleabilidad)
- Resistencia a la corrosión a temperaturas altas. (500°C)
- Resistencia a temperaturas mayores de 500°C . (T servicio mínima 500C)
- Soldable. (TIG o GTAW)
- Precio accesible. ($< 3 \text{ USD/kg}$, presupuesto para la construcción del horno)
- Buen acabado superficial. (Pulido, estéticamente agradable)

3.9.1. Material Metálico ($E > 200\text{GPa}$)

En el Software Ces EduPack, se realizó una búsqueda de material (nivel 3), se limitó solo a materiales metálicos y aleaciones por presentar propiedades físicas, como, alta firmeza, solidez, resistencia a la fatiga de uso, además procesos óptimos de conformación, mecanización y soldadura; se seleccionó un módulo de elasticidad mayor a 200 GPa para evitar deformaciones, los resultados se presentan en la Figura 21-3.

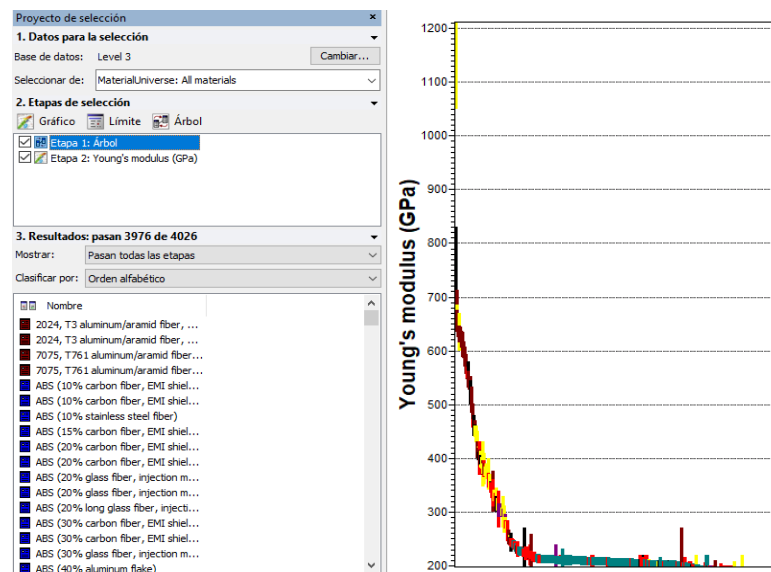


Figura 21-3. Materiales metálicos con un módulo de elasticidad mayor a 200GPa .

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.9.2. Ductilidad (5-20% de elongación)

Se necesita un material maleable, en la Figura 22-3, se observa que la lista de materiales se reduce al aplicar un límite de elongación del 5 al 20%, por su facilidad en el doblado para la construcción de su equipo.

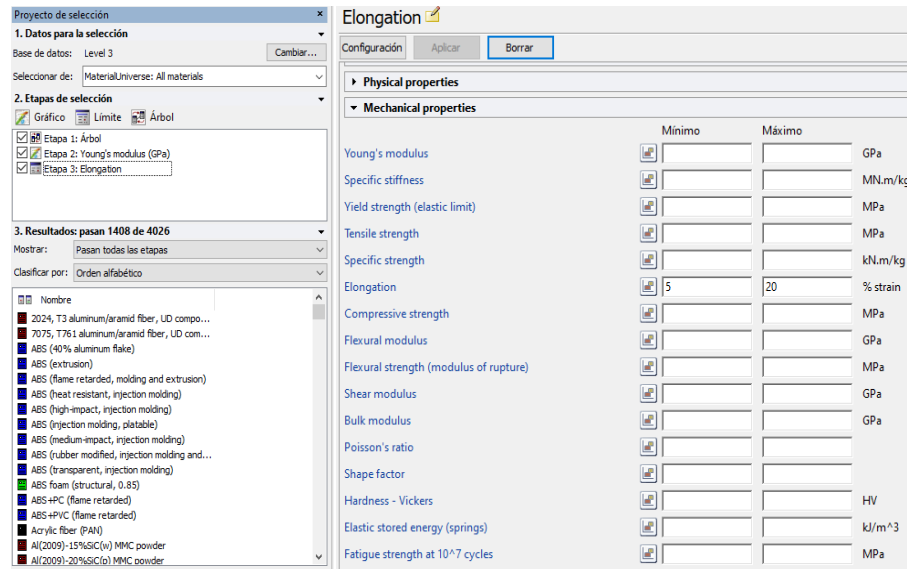


Figura 22-3. Materiales metálicos con elongación del 5 al 20%.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.9.3. Alta resistencia a la corrosión en temperaturas altas

El equipo funcionará a temperaturas mayores de 500°C, por lo que se requiere materiales que sean resistentes a dicha temperatura, los materiales con resistencia a la corrosión a temperaturas de 500°C se muestran en la Figura 23-3.

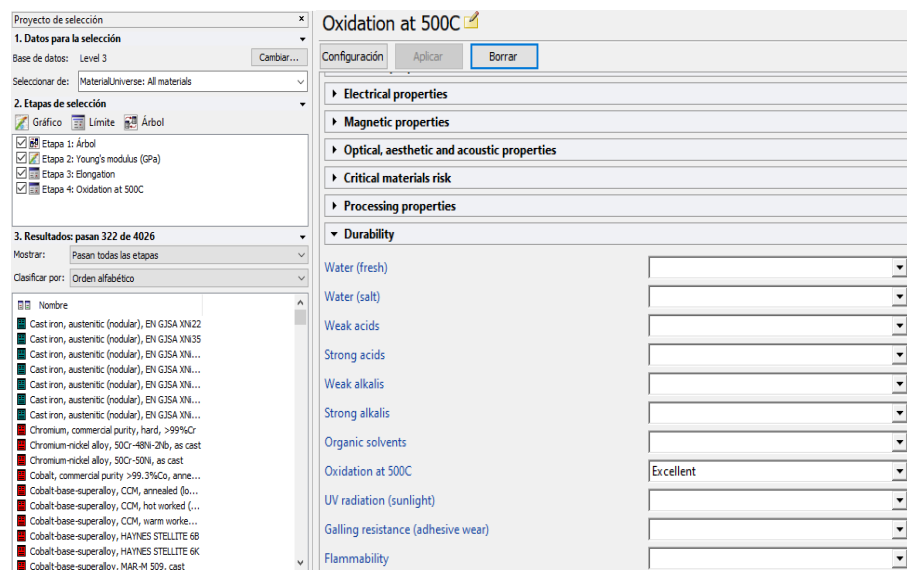


Figura 23-3. Materiales metálicos resistentes a la corrosión a temperatura de 500°C.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.9.4. Resistencia a temperaturas mayores a 500°C

Los materiales que soportan temperaturas de servicio entre 500 a 1000°C sin deformarse, se muestran en la Figura 24-3.

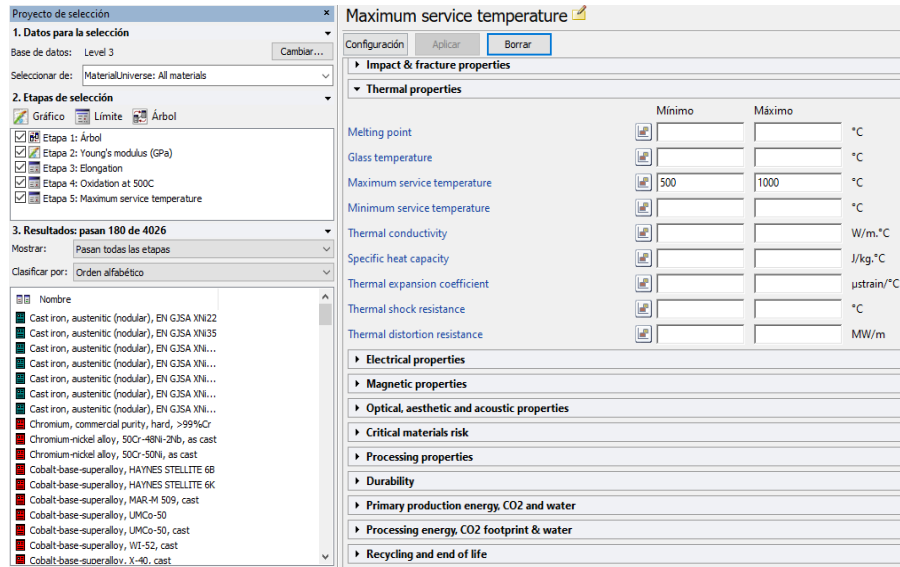


Figura 24-3. Materiales metálicos resistentes a la corrosión a temperatura de 500°C.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.9.5. Soldable

El proceso de soldadura a utilizar es TIG (Gas inerte de tungsteno) ya que, con este proceso se obtienen cordones más resistentes, dúctiles y con alta resistencia a la corrosión. La Figura 25-3 indica todos los materiales que soportan este proceso.

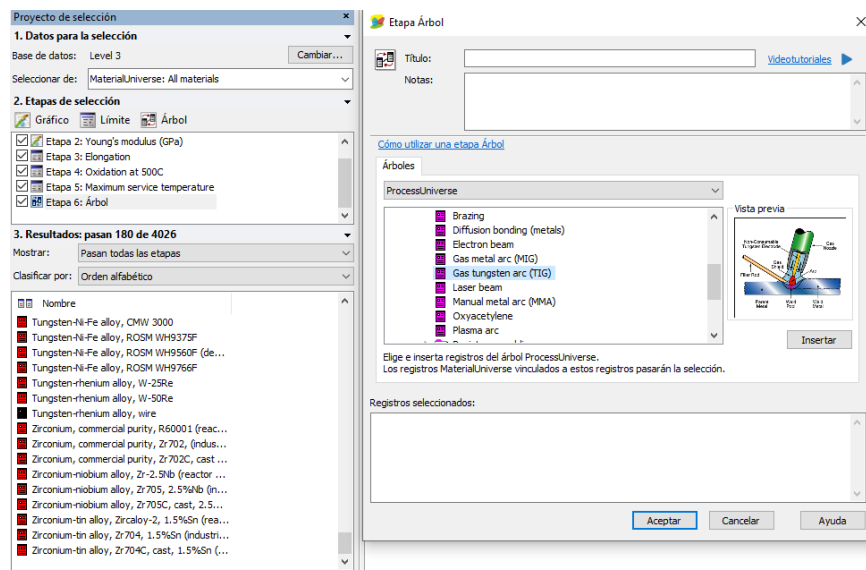


Figura 25-3. Materiales metálicos resistentes a la corrosión a temperatura de 500°C.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.9.6. Precio (< 3,50 USD/kg)

Las planchas de acero existentes en el mercado tienen un peso aproximado de 47 kg, y se estima gastar en el material para el horno alrededor de 200\$, los materiales con un precio menor a 3,50 USD/kg se muestran en la Figura 26-3.

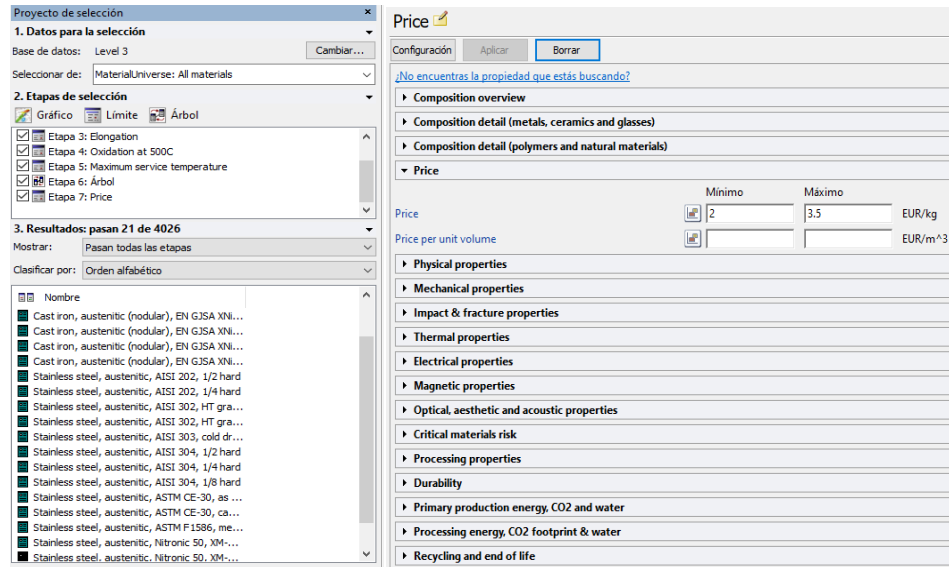


Figura 26-3. Materiales metálicos con precio menor a 3,50 USD/kg.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.9.7. Buen acabado superficial

El material debe tener un tratamiento superficial de pulido y bruñido mecánico, para conseguir un aspecto estéticamente agradable y un color uniforme, en la Figura 27-3 se muestra el listado de materiales que cumplen con este requerimiento.

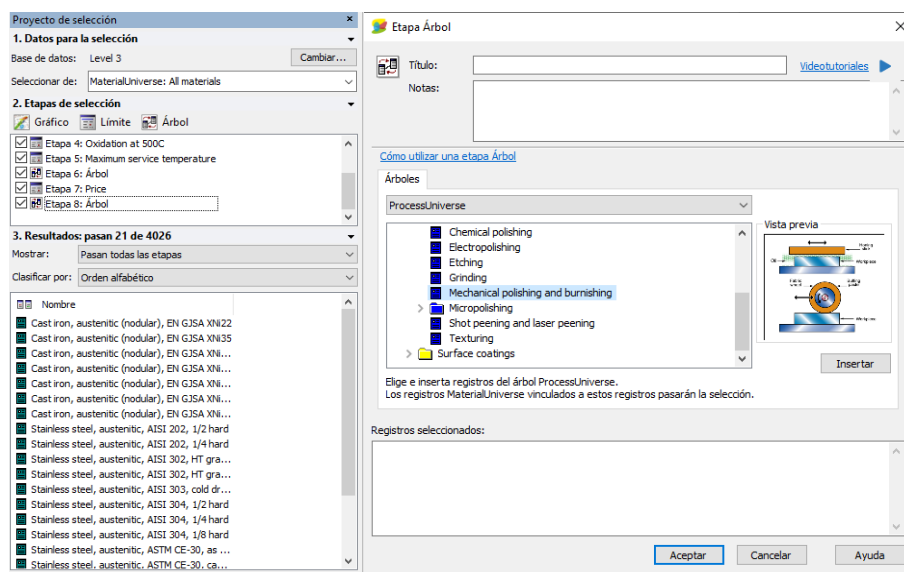


Figura 27-3. Materiales metálicos con pulido y bruñido.

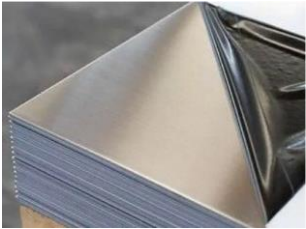
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

De los 4026 materiales metálicos disponibles en una búsqueda de nivel 3, solo 21 cumplen con todos los requerimientos necesarios para la construcción, por la disponibilidad del mercado en la ciudad de Riobamba se ha tomado la decisión de adquirir un acero AISI 304 pulido.

Debido a las restricciones impuestas para el material, se selecciona uno de 2 mm de espesor para facilitar la soldadura, garantizando un cordón continuo y uniforme sin perforar el material, además que con este espesor es más fácil doblar el material.

Las propiedades del acero AISI 304 se presentan en la Tabla 10-3

Tabla 10-3. Propiedades del Acero AISI 304.

	Material: AISI 304 (Acero al Cromo – Níquel) Tipo: Austenítico	
Especificaciones		
Composición Química	$\leq 0,08 \text{ C}; \leq 1 \text{ Si}; \leq 2 \text{ Mn}; 0,04 \text{ P}; 0,03 \text{ S}; 8-10,5 \text{ Ni}; 18-20 \text{ Cr}$	
Resistencia mecánica	49 kg/mm^2	69500 Psi
Punto de fusión	1398 – 1454°C	
Temperatura recomendada de trabajo	$< 925^\circ\text{C}$	
Dimensiones	1220 x 2440 x 2 mm	

Fuente: (Import Aceros, 2020)

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.10. Diseño térmico del horno.

En este apartado se presenta el diseño del sistema térmico presente en el banco didáctico, para esto, se realiza el balance de energía y se determina la Potencia que el equipo requiere de las resistencias eléctricas. Este análisis se basa en el requerimiento de que las resistencias sean encapsuladas en cámaras cilíndricas.

3.10.1. Calor requerido en la etapa crítica.

Inicialmente, para el análisis térmico, se asume una resistencia de cuarzo de diámetro de 10 mm para cada una de las 3 etapas, esto debido a que según sus especificaciones alcanza temperaturas de hasta 1000°C. Este análisis se realiza en las etapas correspondientes a los termopares tipo J y K (500°C), debido a que la etapa del termopar T alcanza menores temperaturas (400°C).

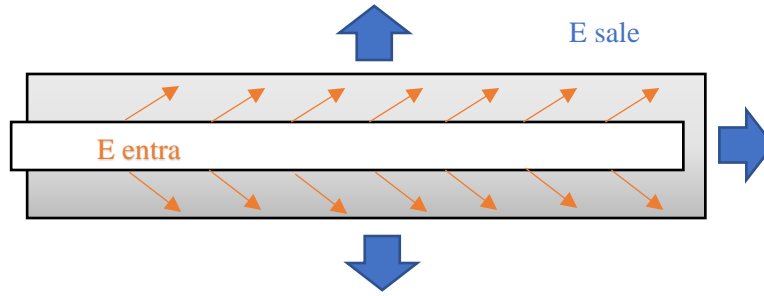


Figura 28-3. Análisis de energía entre la resistencia y la cámara.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

$$\Sigma E_{ent} = \Sigma E_{sal} \quad (1)$$

$$Q_{r_{elect}} = Q_{ad_{sal}} + Q_{perd} [W]$$

Energía que entra a la cámara:

$Q_{r_{elect}}$: Calor entregado por la resistencia eléctrica, [W]

Energía que sale de la cámara:

$Q_{ad_{sal}}$: Calor adicional necesario para calentar el aire, [W]

Q_{perd} : Pérdidas de calor por radiación y convección del ambiente, [W]

El calor necesario para calentar el aire en el interior de la etapa, se calcula utilizando la Ecuación (2)

$$Q_{ad_{sal}} = \frac{m_{aire} C_{p_{aire}} \Delta T}{t} [W]$$

$$Q_{ad_{sal}} = \frac{m_{aire} C_{p_{aire}} (T_i - T_{\infty})}{t} [W] \quad (2)$$

Dónde:

$Q_{ad_{sal}}$: Calor necesario para calentar el aire, [W]

m_{aire} : Masa de aire dentro de la etapa, [Kg]

$C_{p_{aire}}$: Calor específico del aire, [J/kg.K]

ΔT : Diferencia de la temperatura interior de la etapa con la temperatura del ambiente, [K]

t : Tiempo de calentamiento de la etapa, [s]

Para calcular la masa de aire en el interior de la etapa se usa la Ecuación (3), se considera al aire como un gas ideal y las propiedades necesarias para el cálculo se muestra en la Tabla 11-3

$$m_{aire} = \frac{PV}{RT} [kg] \quad (3)$$

Dónde:

m_{aire} : Masa de aire, [kg]

P : Presión del fluido, [kPa]

V : Volumen del aire, [m³]

R : Constante del aire, [kJ/kg.K] ($R=0,2870$)

T : Temperatura del aire, [K]

Tabla 11-3. Propiedades iniciales para calcular la masa de aire en el interior de la etapa.

Presión de la cámara (P) [kPa]	Volumen de aire en la cámara [m ³]	Constante del gas (R) [kJ/kg.K]	Temperatura del entorno (T_{∞}) [K]
73.06	5.459E-04	0.287	292.15

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

$$m_{aire} = 4.7567 \times 10^{-4} kg$$

Los valores que se utilizaran en la Ecuación (2) se muestran en la Tabla 12-3, que son las propiedades del aire a temperatura de película (media aritmética entre la temperatura en la superficie de la capa límite del sólido y la temperatura del fluido). Las propiedades del aire se encuentran en la tabla A-15 del libro ÇENGEL, mostrada en el anexo A.

Tabla 12-3. Propiedades del aire para calcular el calor requerido en el interior de la cámara.

Sustancia	Masa de aire (m_{aire}) [kg]	Calor específico (Cp) [J/kg.K]	Temperatura Ambiente (T_{∞}) [°C]	Temperatura cámara (Ti) [°C]	Tiempo de calentamiento (t) [s]
Aire	4.7567×10^{-4}	1041.91	19	500	1800

Fuente: (ÇENGEL, 2007)

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

El calor específico se obtiene a la temperatura de la película

$$T_f = \frac{1}{2}(T_s + T_\infty) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4)$$

$$T_f = 259.5^\circ\text{C}$$

Donde:

T_f : Temperatura de la película de aire, [°C]

T_s : Temperatura de la superficie, [°C]

T_∞ : Temperatura del fluido a temperatura ambiente, [°C]

El calor necesario para calentar el aire es:

$$Q_{ad_{sal}} = 0.1324 \text{ W}$$

3.10.2. Cálculo de calor por pérdidas.

Las pérdidas de calor que se producen en las superficies interiores de la cámara y generadas por la resistencia eléctrica son por radiación y convección natural.

$$Q_{perd} = Q_{perd_{rad}} + Q_{perd_{conv}} \text{ [W]} \quad (5)$$

Dónde:

Q_{perd} : Calor total de pérdidas, [W]

$Q_{perd_{rad}}$: Calor de pérdidas por radiación, [W]

$Q_{perd_{conv}}$: Calor de pérdidas por convección, [W]

3.10.3. Pérdidas por radiación.

El calor por pérdidas de radiación se produce en la resistencia eléctrica hacia las paredes de la cámara, se utiliza la Ecuación (6), Anexo B. Las propiedades del cuarzo y el acero inoxidable AISI 304 se muestran en la Tabla 13-3.

$$Q_{perd_{rad}} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \text{ [W]} \quad (6)$$

Donde:

$Q_{perdrad}$: Calor de pérdidas por radiación, [W]

ε_1 : Emisividad del material radiante

ε_2 : Emisividad del material que soporta la radiación

σ : Constante de Stefan-Boltzmann, [W/m².K⁴]

A_1 : Área superficial radiante, [m²]

T_1 : Temperatura de la superficie radiante, [K]

T_2 : Temperatura de la superficie fría, [K]

Tabla 13-3. Propiedades del cuarzo y el acero para los cálculos de la radiación.

Material radiante	Emisividad (ε)	Constante (σ) [W/m ² K ⁴]	Área superficial (As) [m ²]	Temperatura de superficie (Tse) [K]
Cuarzo	0.93	5.67×10^{-8}	8.7965×10^{-3}	773.15
AISI 304	0.3	5.67×10^{-8}	0.0447	292.15

Fuente: (ÇENGEL, 2007)

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

$$Q_{perdrad} = 113,7655 \text{ W}$$

3.10.4. Pérdidas por convección

De igual manera, el análisis de convección se analiza de la resistencia hacia la cámara con la Ecuación (7), Anexo C. Las propiedades del aire evaluadas a temperatura de película ($T_f = 259.5^\circ\text{C}$) se presentan en la Tabla 14-3.

$$Q_{perdconv} = \frac{2\pi k_{ef}}{\ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)} (T_i - T_0) [W/m] \quad (7)$$

Dónde:

$Q_{perdconv}$: Calor de pérdidas por convección, [W]

k_{ef} : Conductividad térmica efectiva, [W/m.K]

D_0 : Diámetro del cilindro exterior, [m]

D_i : Diámetro del cilindro interior, [m]

T_i : Temperatura de la superficie del cilindro interior, [K]

T_0 : Temperatura de la superficie del cilindro exterior, [K]

Tabla 14-3. Propiedades del aire para calcular el calor por convección entre cilindros concéntricos.

Sustancia	Densidad (ρ) [kg/m ³]	Calor específico (Cp) [J/kg.K]	Conductividad Térmica (k) [W/m.K]	Viscosidad cinemática (ν) [m ² /s]	Número de Prandtl (Pr)
Aire	0.6269	1041.91	0.0435	4.6369 x 10 ⁻⁵	0.6937

Fuente: (ÇENGEL, 2007)

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

La longitud característica para cilindros concéntricos es el espaciamiento que existe entre los dos, viene expresada como la Ecuación (8).

$$Lc = \frac{(D_0 - D_i)}{2} [m] \quad (8)$$

Dónde:

D_0 : Diámetro del cilindro exterior, [m]

D_i : Diámetro del cilindro interior, [m]

Con los valores de diámetro: $D_0 = 5,08 \text{ cm}$ y $D_i = 1 \text{ cm}$, y de temperatura: $T_i = 773.15K$ y $T_0 = 292.15K$, se calcula:

$$Lc = 0.0204 \text{ m}$$

El factor geométrico para cilindros concéntricos se determina con la Ecuación (9).

$$F_{cil} = \frac{[\ln(D_0/D_i)]^4}{Lc^3(D_i^{-3/5} + D_0^{-3/5})^5} \quad (9)$$

Dónde:

D_0 : Diámetro del cilindro exterior, [m]

D_i : Diámetro del cilindro interior, [m]

Lc : Longitud característica, [m]

$$F_{cil} = 1.659 \times 10^{-7}$$

El número de Rayleigh se calcula con la Ecuación (10), con los datos del fluido a temperatura de película T_f .

$$Ra_L = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_i - T_0)Lc^3}{\nu^2} Pr \quad (10)$$

Dónde:

Ra_L : Número de Rayleigh del fluido, [adm]

Gr : Número de Grashof del fluido a temperatura de película, [adm]

β : Coeficiente de expansión volumétrica ($\beta = 1/T_f$ para gases ideales)

T_i : Temperatura de la superficie, [°C]

T_0 : Temperatura del fluido, [°C]

ν : viscosidad cinemática del fluido, [m/s^2]

Pr : Número de Prandtl del fluido a temperatura de película, [adm]

$$Ra_L = 4.980 \times 10^{10}$$

$$F_{cil} Ra_L = 8.264 \times 10^3$$

La relación de k_{ef} es aplicable si se cumplen las siguientes condiciones:

$$0 \leq Pr \leq 600$$

$$10^2 \leq F_{cil} Ra_L \leq 10^7$$

En caso de $F_{cil} Ra_L < 100$, $k_{ef} = k$

Para calcular la conductividad térmica efectiva se utiliza la relación recomendada por Raithby y Hollands mostrada en la Ecuación (11).

$$k_{ef} = 0.386k \left(\frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{1/4} (F_{cil} Ra_L)^{1/4} \quad (11)$$

Dónde:

k_{ef} : Conductividad térmica efectiva, [W/m.K]

k : Conductividad térmica del fluido a temperatura de película, [W/m.K]

Pr : Número de Prandtl del fluido a temperatura de película, [adm]

F_{cil} : Factor geométrico para los cilindros concéntricos, [adm]

Ra_L : Número de Rayleigh del fluido, [adm]

$$k_{ef} = 0.1308 [W/m.K]$$

$$Q_{perd_{conv}} = 243.3 [W/m]$$

El calor de pérdida por convección, se obtiene del producto entre la longitud de la cámara (0.28 m) por la relación de calor encontrada.

$$Q_{perd_{conv}} = 68.124[W]$$

Y el calor total de pérdidas es:


$$Q_{perd} = 181.88[W]$$

Despejando el calor de la resistencia en la Ecuación (1), se obtiene la Potencia requerida de la resistencia para calentar la etapa.

$$Q_{r_{elect}} = 182.0219 [W]$$

Se concluye que, para las etapas con temperatura de 500°C, se requiere de una potencia de 182 [W], por la disponibilidad que existe en el mercado se optó por resistencias de cuarzo de 10mm con potencia de 325 [W], cumpliendo con los requerimientos de las dos etapas a 500°C, y por consecuencia, también de la etapa a 400°C. Las especificaciones de la resistencia se detallan en la Tabla 15-3.

Tabla 15-3. Especificaciones de las resistencias térmicas de cuarzo.

	<p>Tipo: Resistencia térmica de cuarzo. Marca: Tesa</p>
Especificaciones	
Potencia	325 watts
Voltaje	110 voltios
Longitud	27,5 cm
Diámetro	9 mm

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Las cámaras o etapas para cada termocupla, se diseñaron de sección cilíndrica para aprovechar el espacio de calentamiento disponible y para uso exclusivo de cada par de sensores. Estas etapas tienen una separación de 9,5 cm entre centros y están elaboradas de acero inoxidable AISI 304.

En las Figuras 29-3 y 30-3 se puede observar el dimensionamiento y el diseño de las etapas, y en la Tabla 16-3 se especifica las características del material.

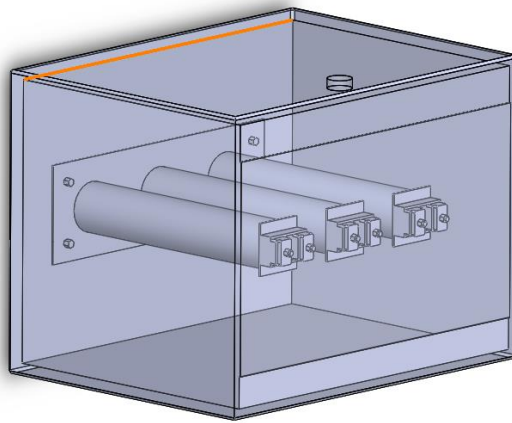


Figura 29-3. Diseño de las etapas del horno.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

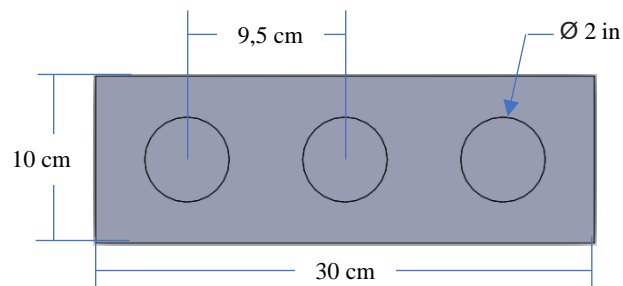



Figura 30-3. Dimensiones de las etapas del horno.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Tabla 16-3. Propiedades de la tubería de Acero AISI 304.

	<p>Material: AISI 304 (Acero al Cromo – Níquel) Tipo: Austenítico.</p>
Especificaciones	
Dimensiones	Tubería de 2 pulgadas y 3 m de largo

Punto de fusión	1398-1454°C
Temperatura de trabajo recomendada	< 925°C

Fuente: (Octalacero, 2020)

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.11. Selección del material del aislante.

Con la ayuda del software CES EduPack, se selecciona también el material para el aislante, considerando los siguientes parámetros indicados en la Tabla 17-3.

Tabla 17-3. Requerimientos y rangos para la selección del material del aislante.

Requerimientos	Rangos
Conductividad térmica	< 0.04 W/m. °C
Temperatura de servicio	< 100°C
Costo	< 9 USD/kg

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Los materiales con la propiedad de conductividad térmica menor a 0.04 W/m. °C, se muestran en la Figura 31-3.

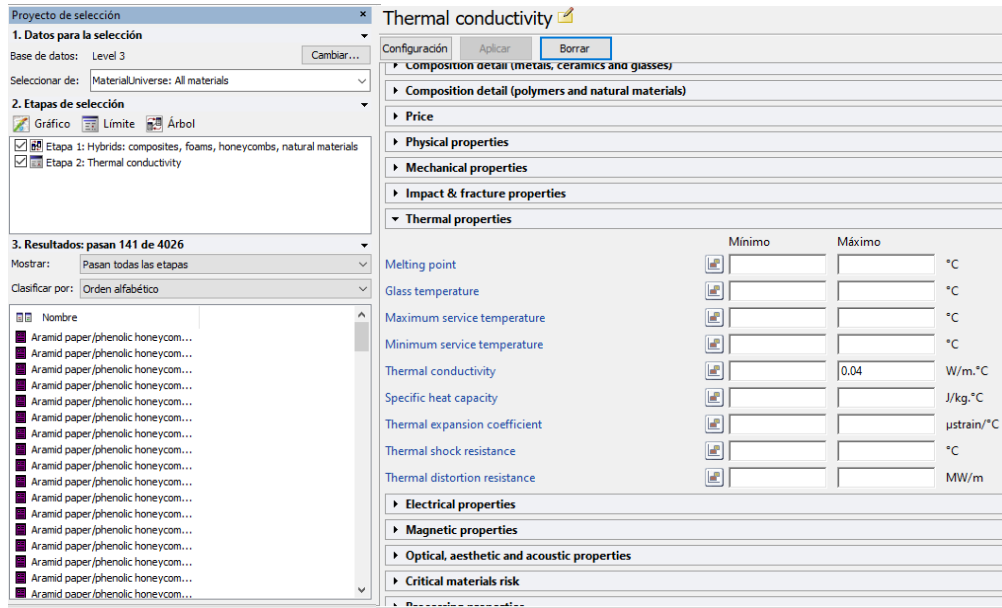


Figura 31-3. Aislantes con un coeficiente de conductividad menor a 0,04 W/m. °C.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

De esta lista de materiales, los que pueden trabajar hasta temperaturas de 100°C sin deformarse, se indican en la Figura 32-3.

The screenshot shows a software interface with a search filter on the left and a results table on the right. The filter is set to 'Maximum service temperature' and shows 48 results out of 4026. The results table lists various materials with their minimum and maximum service temperatures.

Material	Mínimo	Máximo	Unit
Melting point			°C
Glass temperature			°C
Maximum service temperature		100	°C
Minimum service temperature			°C
Thermal conductivity			W/m.°C
Specific heat capacity			J/kg.°C
Thermal expansion coefficient			µstrain/°C
Thermal shock resistance			°C
Thermal distortion resistance			MW/m

Figura 32-3. Aislantes con temperaturas de servicio de 100°C.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Finalmente, se requiere de un material económico, en el mercado existen rollos de aislantes de aproximadamente 4 kg, lo óptimo es comprar un solo rollo y gastar menos de 50 \$, los materiales con valores menores a 9 USD/kg se muestran en la Figura 33-3.

The screenshot shows a software interface with a search filter on the left and a results table on the right. The filter is set to 'Price' and shows 22 results out of 4026. The results table lists various materials with their price per unit volume.

Material	Mínimo	Máximo	Unit
Price		9	EUR/kg
Price per unit volume			EUR/m ³

Figura 33-3. Aislantes con precio menor a 9 USD/kg.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Como resultado de este análisis se filtró 22 posibles soluciones para aislante, de los cuáles por disponibilidad del mercado y facilidad de instalación se seleccionó el polietileno.

3.11.1. Cálculo del espesor del aislante entre etapas.

Para calcular el espesor del aislante entre etapas y conservar el calor de cada una sin alterar a la otra, se debe realizar un balance de energía en la superficie exterior del aislante. Según la norma NTE INEN 2259, la temperatura en las superficies externas del horno no debe exceder en 100°C a la del ambiente. Debido a la geometría que presenta el horno se considera que la temperatura entre etapas y la carcasa es de, $T_{se} = 60^\circ\text{C}$.

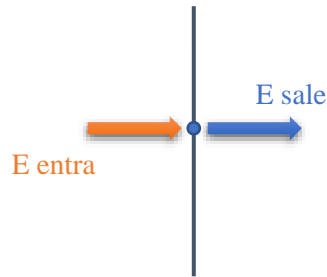


Figura 34-3. Relación Conductividad térmica vs Precio.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

$$\Sigma E_{ent} = \Sigma E_{sal}$$

$$Q_{cond} = Q_{perd_{rad}} + Q_{perd_{conv}} \quad (12)$$

Dónde:

Q_{cond} : Calor por conducción, [W]

$Q_{perd_{rad}}$: Calor por pérdidas de radiación, [W]

$Q_{perd_{conv}}$: Calor por pérdidas de convección, [W]

3.11.1.1. Calor de pérdidas por radiación

Para calcular las pérdidas de calor por radiación de la etapa se utiliza la Ecuación (13), y los parámetros necesarios se indican en la Tabla 18-3.

$$Q_{perd_{rad}} = \varepsilon \sigma A_s (T_{se}^4 - T_{\infty}^4) [W] \quad (13)$$

Dónde:

$Q_{perd_{rad}}$: Calor por pérdidas de radiación, [W]

ε : Emisividad del material, [adm]

A_s : Área superficial radiante, [m²]

T_{se} : Temperatura de superficie, [K]

T_{∞} : Temperatura del entorno, [K]

Tabla 18-3. Parámetros de la superficie de acero AISI 304.

Material radiante	Emisividad (ϵ)	Constante (σ) [W/m^2K^4]	Área superficial (A_s) [m^2]	Diámetro de etapa (D) [cm]	Espacio entre etapas (s) [cm]	Temperatura de superficie (T_{se}) [K]	Temperatura del entorno (T_{∞}) [K]
AISI 304	0.3	5.67×10^{-8}	0.0447	5.08	9.5	333.15	292.15

Fuente: (ÇENGEL, 2007)

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

$$Q_{perd_{rad}} = 3.8273 [W]$$

3.11.1.2. Calor por pérdidas de convección

Para calcular las pérdidas de la etapa por convección se utiliza la Ecuación (14), y los parámetros del aire se evalúan a temperatura de película $T_f = 39.5^{\circ}C$.

$$Q_{perd_{conv}} = hA_s(T_{se} - T_{\infty}) [W] \quad (14)$$

Dónde:

h : Coeficiente de convección del fluido, [W/m^2K]

A_s : El área superficial de convección, [m^2]

T_{se} : Temperatura de la superficie exterior, [K]

T_{∞} : Temperatura del entorno, [K]

Tabla 19-3. Parámetros del aire a temperatura de $39.5^{\circ}C$.

Sustancia	Densidad (ρ) [kg/m^3]	Calor específico (Cp) [J/kg.K]	Conductividad Térmica (k) [W/m.K]	Viscosidad cinemática (ν) [m^2/s]	Número de Prandtl (Pr)
Aire	1.128	1007	0.02660	1.7×10^{-5}	0.7256

Fuente: (ÇENGEL, 2007)

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Inicialmente, se determina el número de Rayleigh con la Ecuación (15) y los parámetros del aire a temperatura de película.

$$Ra_L = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_i - T_0)Lc^3}{\nu^2} Pr \quad (15)$$

$$Ra_L = 9.6945 \times 10^8$$

Para cilindros horizontales el número de Nusselt según Cengel se calcula con la Ecuación (16), si cumple con la condición de $Ra_L \leq 10^{12}$

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (16)$$

Dónde:

Ra_L : Número de Rayleigh, [adm]

Pr : Número de Prandtl, [adm]

$$Nu = 115.01$$

La Ecuación (17) para calcular el coeficiente de convección es la siguiente.

$$h = \frac{Nu k}{L} [W/m^2 \cdot K] \quad (17)$$

Dónde:

Nu : Número de Nusselt, [adm]

k : Conductividad térmica del fluido a temperatura de película, [W/m.K]

L : Longitud característica, [m] ($L=D$ en cilindros horizontales)

$$h = 60.222 [W/m^2 \cdot K]$$

El área superficial correspondiente del cilindro es de $A_s = 0.0447 m^2$.

Reemplazando los valores en la Ecuación (14), tenemos.

$$Q_{perd_{conv}} = 110.37 [W]$$

Se suma el calor total por pérdidas

$$Q_{perd} = 114.1966 [W]$$

Para calcular el espesor del aislante se reemplazan estos valores en la Ecuación (18), tomando en cuenta que la variación de la temperatura en el aislante debe ser entre la temperatura máxima de la resistencia con la temperatura ambiente.

$$Q_{cond} = kAs \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (18)$$

Dónde:

k : conductividad térmica del aislante, [W/m.K]

As : Área superficial del aislante, [m²]

$$kAs \frac{\Delta T}{\Delta x} = Q_{perd}$$

$$\Delta x = 13.26 \text{ mm}$$

En el mercado existen rollos de polietileno de 10 mm de espesor, por lo que se consideró una doble capa de aislante con las siguientes características:

Tabla 20-3. Especificaciones del rollo de polietileno con aluminio.

	<p>Modelo: Rollo de polietileno expandido con aluminio. Marca: Tesa</p>
Especificaciones	
Descripción	Polietileno de celda cerrada con una cara de aluminio
Conductividad	0,035 W/m.K
Espesor	10 mm
Ancho	1,20 m
Aplicaciones	Automotriz, Industrial, comercio, etc.

Fuente: (Aconstructoras, 2020)

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.11.2. Cálculo del espesor del aislante del horno al ambiente.

La norma NTE INEN 2259 indica, que la temperatura que emite un horno al ambiente debe ser menor a la suma de la temperatura ambiente más 100°C. La temperatura promedio que el contacto humano soporta sin quemaduras ni lesiones es de 40°C, de esta manera para el cálculo del espesor del aislante la $T_{se} = 40^\circ\text{C}$ y la $T_\infty = 19^\circ\text{C}$.

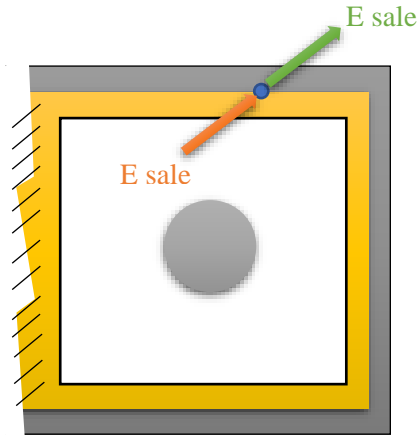


Figura 35-3. Análisis de energía en la cara exterior del aislante.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

El cálculo del espesor del aislante se realiza en las 5 paredes, se utiliza la Ecuación (19).

$$\Sigma E_{ent} = \Sigma E_{sal}$$

$$Q_{cond} = Q_{perd_{rad}} + Q_{perd_{conv}} \quad (19)$$

Para el cálculo de las pérdidas por radiación se utiliza la Ecuación (20).

$$Q_{perd_{rad}} = \varepsilon \sigma A_s (T_{se}^4 - T_{\infty}^4) [W] \quad (20)$$

Dónde:

$Q_{perd_{rad}}$: Calor por pérdidas de radiación, [W]

ε : Emisividad del material, [adm]

A_s : Área superficial radiante, [m²]

T_{se} : Temperatura de superficie, [K]

T_{∞} : Temperatura del entorno, [K]

Tabla 21-3. Propiedades del Acero AISI 304.

Material radiante	Emisividad (ε)	Constante (σ) [W/m ² K ⁴]	Área superficial (As) [m ²]	Diámetro de etapa (D) [cm]	Espacio entre etapas (s) [cm]	Temperatura de superficie (Tse) [K]	Temperatura del entorno (T ∞) [K]
AISI 304	0.3	5.67 x10 ⁻⁸	0.0447	5.08	9.5	313.15	292.15

Fuente: Çengel, 2007)

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

$$Q_{perd_{rad}} = 1.772 [W]$$

Usando la Ec. (21) para el cálculo de pérdidas por convección, y las propiedades del aire se encuentra a temperatura de película $T_f = 29.5^\circ\text{C}$ mostradas en la Tabla 22-3.

$$Q_{perd_{conv}} = hA_s(T_{se} - T_\infty) [W] \quad (21)$$

Dónde:

h : Coeficiente de convección del fluido, $[W/m^2K]$

A_s : El área superficial de convección, $[m^2]$

T_{se} : Temperatura de la superficie exterior, $[K]$

T_∞ : Temperatura del entorno, $[K]$

Tabla 22-3. Propiedades del aire a temperatura de 29.5°C .

Sustancia	Densidad (ρ) [kg/m ³]	Calor específico (Cp) [J/kg.K]	Conductividad Térmica (k) [W/m.K]	Viscosidad cinemática (ν) [m ² /s]	Número de Prandtl (Pr)
Aire	1.163	1007	0.02573	1.860×10^{-5}	0.7288

Fuente: (Çengel, 2007)

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

El cálculo del coeficiente de convección se lo determina con la Ecuación (22).

$$h = \frac{Nuk}{L} [W/m^2.K] \quad (22)$$

Se calcula el número de Rayleigh con la Ecuación (23).

$$Ra_L = Gr.Pr = \frac{g\beta(T_i - T_0)Lc^3}{\nu^2} Pr \quad (23)$$

$$Ra_L = 28.2164 \times 10^6$$

El número de Nusselt para placas verticales según Bergman viene dado por la Ecuación (24), y se utiliza si cumple con $0 < Pr < \infty$ y $0 \leq Ra_L < 10^9$.

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (24)$$

$$Nu = 38.2716$$

$$h = 3.2824 [W/m^2.K]$$

El área superficial de las paredes verticales es diferente, se tienen dos paredes de $A_s = 0.04575 m^2$ y una pared de $A_s = 0.09 m^2$.

$$Q_{perd_{conv}} = 3.15 [W], A_s = 0.04575m^2$$

$$Q_{perd_{conv}} = 6.20 [W], A_s = 0.09m^2$$

$$Q_{perd_{conv}} = 12.5 [W]$$

El calor por convección en paredes horizontales superficie superior se calcula con la Ecuación (25), si $10^4 < Ra_L < 10^7$, se cumple.

$$Nu = 0.54Ra_L^{1/4} \quad (25)$$

$$Nu = 39.3567$$

$$h = 20.253 [W/m^2.K]$$

El área superficial del techo del horno es de $A_s = 0.04575 m^2$.

$$Q_{perd_{conv}} = 19.458 [W]$$

El calor por convección en paredes horizontales superficie inferior se calcula con la Ecuación (26), si $10^5 < Ra_L < 10^{11}$, se cumple.

$$Nu = 0.27Ra_L^{1/4} \quad (26)$$

$$Nu = 19.6783$$

$$h = 10.12[W/m^2.K]$$

El área superficial de la base del horno es de $A_s = 0.04575 \text{ m}^2$

$$Q_{perd_{conv}} = 9.728 \text{ [W]}$$

El calor total por convección en paredes, el techo y la base.

$$Q_{perd_{conv}} = 41.686 \text{ [W]}$$

El calor total de pérdidas es igual a la suma de la convección más la radiación.

$$Q_{perd} = 43.458 \text{ [W]}$$

Se despeja el espesor del aislante de la Ecuación (19).

$$Q_{cond} = Q_{perd}$$

$$kA_s \frac{\Delta T}{\Delta x} = 43.458 \text{ [W]}$$

La conductividad térmica del aislante de polietileno es de $k = 0.035 \text{ W/m}^2\text{K}$ y el área superficial que se ocupa es la más alta $A_s = 0.09 \text{ m}^2$

$$\Delta x = 1.522 \text{ mm}$$

El espesor del aislante a utilizar en las paredes de la carcasa será el mismo seleccionado en las etapas, esto para optimizar el uso del material.

3.12. Simulación Estática de la estructura del banco en SolidWorks

La estructura se sometió a un análisis estático, mediante el complemento SolidWorks Simulation, los parámetros para el análisis se presentan en la Tabla 23-3.

Tabla 23-3. Parámetros para la simulación estática

Nombre del Análisis	Análisis Estático de la estructura
Material	Hierro Fundido Dúctil
Perfil estructural	Perfil L 20 x 2 x 6000 mm
Conexiones	Sin penetración
Sujeciones	Rodillo Control deslizante
Cargas Externa del tablero de control	150 [N]
Carga Externa del horno	200 [N]

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

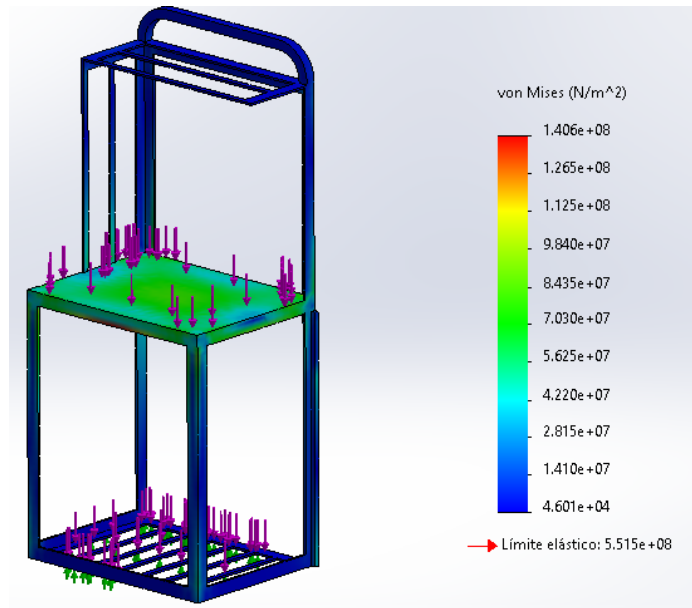


Figura 36-3. Análisis de esfuerzos del soporte del banco con las cargas del tablero y el horno.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Tras realizar la simulación, SolidWorks nos indica el comportamiento estático de la estructura (Figura 36-3) además de los esfuerzos generados (Von Misses) y del Límite elástico del material.

Con los datos generados por el programa se calcula el factor de seguridad mediante la Ecuación (27)

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{Límite elástico del material}}{\text{Esfuerzo máximo de Von Misses}} \quad (27)$$

Dónde:

$$\text{Límite elástico del material} = 5,515 \times 10^8 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

$$\text{Esfuerzo máximo de Von Misses} = 1.406 \times 10^8 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{5.515 \times 10^8}{1.406 \times 10^8} = 3.922$$

3.13. Selección de elementos eléctricos y electrónicos.

Todos los dispositivos eléctricos y electrónicos se encontrarán en el tablero de control en la parte superior del horno, en la Figura 37-3 y 38-3 se puede apreciar el diseño y la distribución de los dispositivos en el tablero.

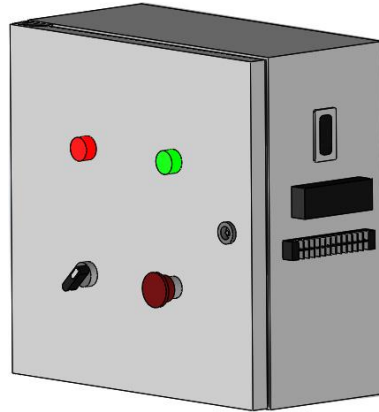


Figura 37-3. Tablero de control.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.



Figura 38-3. Distribución de los dispositivos en el tablero de control.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

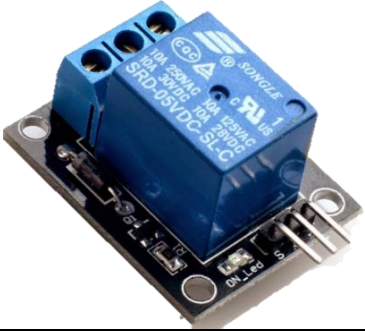
3.13.1. Elementos eléctricos.

3.13.1.1. Relé de estado sólido.

$$i = \frac{P}{V} = \frac{325w}{110v} = 2.95A$$

El módulo relé en el sistema será utilizado para la activación y control PID de las resistencias térmicas de cada etapa del horno, este relé fue obtenido mediante cálculo de la potencia y corresponde a uno ligeramente superior a los 3A, pero debido a que en el mercado no existe uno de esas características se eligió uno de 20A por ser el más aproximado a la potencia disponible, además como notación especial se especifica que el relé posee una entrada digital para poder ser controlado con facilidad desde el microcontrolador elegido (Arduino), a continuación, se muestran las características del módulo relé seleccionado.

Tabla 24-3. Especificaciones del relé de estado sólido.

	<p>Modelo: SRD-05VDC-SL-C Marca: Songle</p>
Espesificaciones	
Voltaje de Operación	5V DC
Señal de control	TTL (3.3V o 5V)
Capacidad Maxima	10A/250VAC, 10A/30VDC
Corriente Maxima	10A (NO), 5A (NC)
Tiempo de Accion	10ms, 5ms
Activacion de salida NO	0 voltios
Extras:	Entradas Opto acopladas Indicadores LED de activacion

Fuente: (Domínguez, 2017)


Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.13.1.2. Contactor.

El equipo utiliza un contactor, para la alimentación de la placa controladora desarrollada la cual será activada y desactivada según la necesidad de uso, además también será utilizado para el

funcionamiento de un paro de emergencia en el sistema de ser necesario. Las características técnicas del contactor son detalladas a continuación.

Tabla 25-3. Especificaciones del contactor del equipo.

	<p>Modelo : MC-9b AC110Vac 50/60Hz Marca : LS (LG Industrial Systems)</p>
Especificaciones	
Máxima tensión de empleo	690Vac
Tensión de la bobina	110Vac
Número de polos del contactor	3
Corriente asignada contactor AC3	9A
Corriente asignada contactor AC1	25A
Potencia Máxima 380-400 Vac	4kW
Potencia Máxima 220-230 Vac	2,5kW
Contactos auxiliares	2 laterales (1abierto y 1 cerrado)


Fuente: (TME Electronic Components, 2020)

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.13.1.3. Pulsador de emergencia.

El elemento pulsador de emergencia es de tipo hongo y de color rojo y se implementó como medida de seguridad en caso de un repentino fallo o accidente en el sistema que pudiera poner en riesgo los demás componentes del equipo, los detalles del mismo vienen detallados en la Tabla 26-3

Tabla 26-3. Especificaciones del pulsador de emergencia.

	<p>Modelo : PRHCAM Marca : Camsco</p>
Especificaciones	
Grado de protección	IP20
Diámetro	44 mm
Tipo de conexión	Roscada
Número de contactos de apertura positiva	2
Tipo de montaje	IE 947-5-1 D30
Corriente térmica de referencia Ith	1ª
Corriente de activación	mín a 24V – 10 mA
Tensión de aislamiento de referencia	250V

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.13.1.4. Luz Piloto.

Estos elementos son utilizados como indicadores, son de tipo led y vienen en distintos colores para diferenciar los distintos estados de funcionamiento del equipo, por ejemplo, el led de color verde representa que el proceso de la maquina está en ejecución y el de color rojo que el horno se encuentra encendido. Las especificaciones técnicas se indican en la Tabla 27-3.

Tabla 27-3. Especificaciones de luz led del equipo.

	Modelo: 763-7921 Marca: CAMSCO
Especificaciones	
Diámetro Exterior	22 mm
Rango de temperatura	-25C° - +55 C°
Grado IP	IP65
Frecuencia AC	50-60 Hz
Forma del led	Circular
Rango de Voltaje	+/- 20% Voltaje nominal

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.13.1.5. Fuente Conmutada.

Para la alimentación de la placa de control se instaló una fuente conmutada la cual por el hecho de ser conmutada ofrece una gran estabilidad en voltaje y eficiencia. Algo que es especialmente necesario en la placa de control y la Raspberry pi utilizada.




Figura 39-3. Fuente conmutada.
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.13.2. Elementos electrónicos.

3.13.2.1. Raspberry PI 3 B+

Mediante el análisis realizado en el módulo de microcontroladores se seleccionó la Raspberry PI 3 MOBEL B+ como dispositivo central para el sistema. Esta placa es una actualización sutil del Modelo Pi 3 B, las mejoras más significativas radican en un overclock al CPU y soporte wifi, además de un disipador para controlar mejor las temperaturas de trabajo y al igual que sus anteriores versiones hace uso de su código abierto y software libre, para ejecutar los procesos de la forma más óptima posible, sus características principales se presentan en la Tabla 28-3.

Tabla 28-3. Especificaciones de la Raspberry Pi 3 B+.

	<p>Modelo: Raspberry Pi 3 Modelo B+ Marca: Raspberry</p>
Especificaciones	
Procesador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC
Frecuencia del reloj	1.4GHz
RAM	1Gb LPDDR2 SDRAM
Conectividad de Red	Gigabit Ethernet USB 2.0 (Máximo Teórico de 300 Mbps)
Conectividad Inalámbrica	2.4GHz / 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac Bluetooth 4.2, BLE
Puertos	GPIO 40 pines HDMI 4 x USB 2.0 CSI (cámara Raspberry Pi) DSI (pantalla táctil) Toma auriculares / vídeo compuesto Micro SD Micro USB (alimentación) Power-over-Ethernet (PoE)


Fuente: (Raspberry Pi Foundation, 2020).

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.13.2.2. Arduino Nano.

Mediante la selección de microcontroladores se seleccionó además una placa Arduino Nano como elemento de paso entre los sensores de temperatura y el procesador central (Raspberry). La placa Arduino nano se caracteriza además de sus prestaciones físicas (tamaño reducido) por las características principales detalladas en la Tabla 29-3.

Tabla 29-3. Especificaciones del microcontrolador Arduino Nano.

	<p style="text-align: center;">Modelo: Arduino Nano Marca: Arduino</p>
<p style="text-align: center;">ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</p>	<p style="text-align: center;">Microcontrolador: ATmega328P Chip USB: CH340 Voltaje de Alimentación: 7V -12V DC Voltaje de I/O: 5V Pines Digitales I/O: 14 (6 PWM) Entradas Analógicas: 8 Corriente máx. entrada/salida: 40mA Memoria FLASH: 32KB (2KB usados por el Bootloader) Memoria SRAM: 2KB Memoria EEPROM: 1KB Frecuencia de Reloj: 16 MHz Dimensiones: 18.5 mm x 43.2 mm</p>
<p style="text-align: center;">FUNCIONALIDADES PRINCIPALES</p>	<p style="text-align: center;">RESET automático al subir un sketch LED azul (POW) en placa para indicar el encendido LED Verde (TX), Rojo (RX) y Naranja (L) Regulador de voltaje (5V) en placa Conector mini-B USB para programación y comunicación serial integrado en placa Conector ICSP para programación Pines con espaciado de 0.1" DIP para insertarlo directamente sobre un protoboard Pulsador de RESET en placa El Bootloader integrado permite programarlo con el entorno de desarrollo Arduino sin necesidad de un programador externo</p>

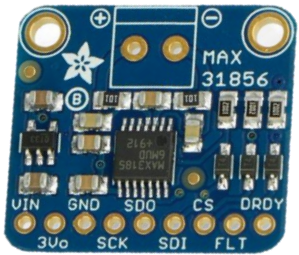
Fuente: (Arduino, 2020)

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.13.2.3. Módulo Acondicionador de temperatura MAX31856.

Debido a que se utilizaran termopares como una parte fundamental de este proyecto, aparece la necesidad de utilizar componentes adicionales como el módulo MAX31856 el cual realiza la lectura de resistencia del sensor y convierte esta señal analógica en un dato digital para ser interpretado por el microcontrolador. Este brinda una gran ventaja a comparación de otras tarjetas similares debido a su capacidad de tomar las medidas de cualquier tipo de termopar, además de destacar por su precisión como la mejor opción para medición de temperatura. Los detalles técnicos del módulo se muestran en la Tabla 30-3.

Tabla 30-3. Especificaciones del módulo acondicionador de temperatura MAX 31856.

	<p>Modelo: Modulo Acondicionador MAX31856 Marca: Adafruit</p>
Especificaciones	
<p style="text-align: center;">Voltaje de Alimentación</p>	<p style="text-align: center;">3.3V a 5V</p>
<p style="text-align: center;">Compatibilidad</p>	<p style="text-align: center;">termopar tipo K, J, N, R, S, T, E o B</p>
<p style="text-align: center;">Rango de Temperatura</p>	<p style="text-align: center;">-210°C a 1800°C</p>
<p style="text-align: center;">Resolución</p>	<p style="text-align: center;">0,0078125 °C</p>
<p style="text-align: center;">Interface</p>	<p style="text-align: center;">SPI (requiere 4 pines de E/S digitales)</p>
<p style="text-align: center;">Dimensiones</p>	<p style="text-align: center;">25x22x3 mm</p>

Fuente: (Adafruit Industries, 2020)

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.14. Diseño del circuito eléctrico

El diseño del circuito eléctrico del sistema se realizó mediante el software CADe SIMU.

El circuito entra en funcionamiento cuando se acciona o se activa la protección térmica del sistema, cabe recalcar que el breaker alimenta un distribuidor de voltaje el cual suministra a todos los componentes un voltaje de 110v, para el encendido del equipo se activa el selector START el cual alimenta la bobina del contactor K, el paro de emergencia se encuentra en serie con la bobina y es un pulsador normalmente cerrado llamado STOP, todo estos componentes sirven como circuito de alimentación para la fuente de la tarjeta desarrollada la cual se puede alimentar con 110v o 220v, una vez conectado el circuito, la placa de control se enciende al igual que se activa una luz indicadora verde, la que muestra que el sistema esta encendido y además activa la tarjeta Raspberry en la cual se encuentra instalado un puerto VGA y un módulo de puerto USB para la comunicación. Las ordenes de activación para los relés de estado sólido son enviadas por la tarjeta de control, la cual envía o proporciona un voltaje de 5v para el control y el relé de estado sólido alimenta las resistencias eléctricas con un voltaje de 110v y a su vez cuando una resistencia es encendida se activa una luz indicadora roja para advertir al usuario que el horno se encuentra encendido y debe de proceder con cuidado. Una parte importante es la instalación de las distintas termocuplas las cuales son conectadas directamente del exterior por una bornera hacia las entradas de sensores de la tarjeta de control.

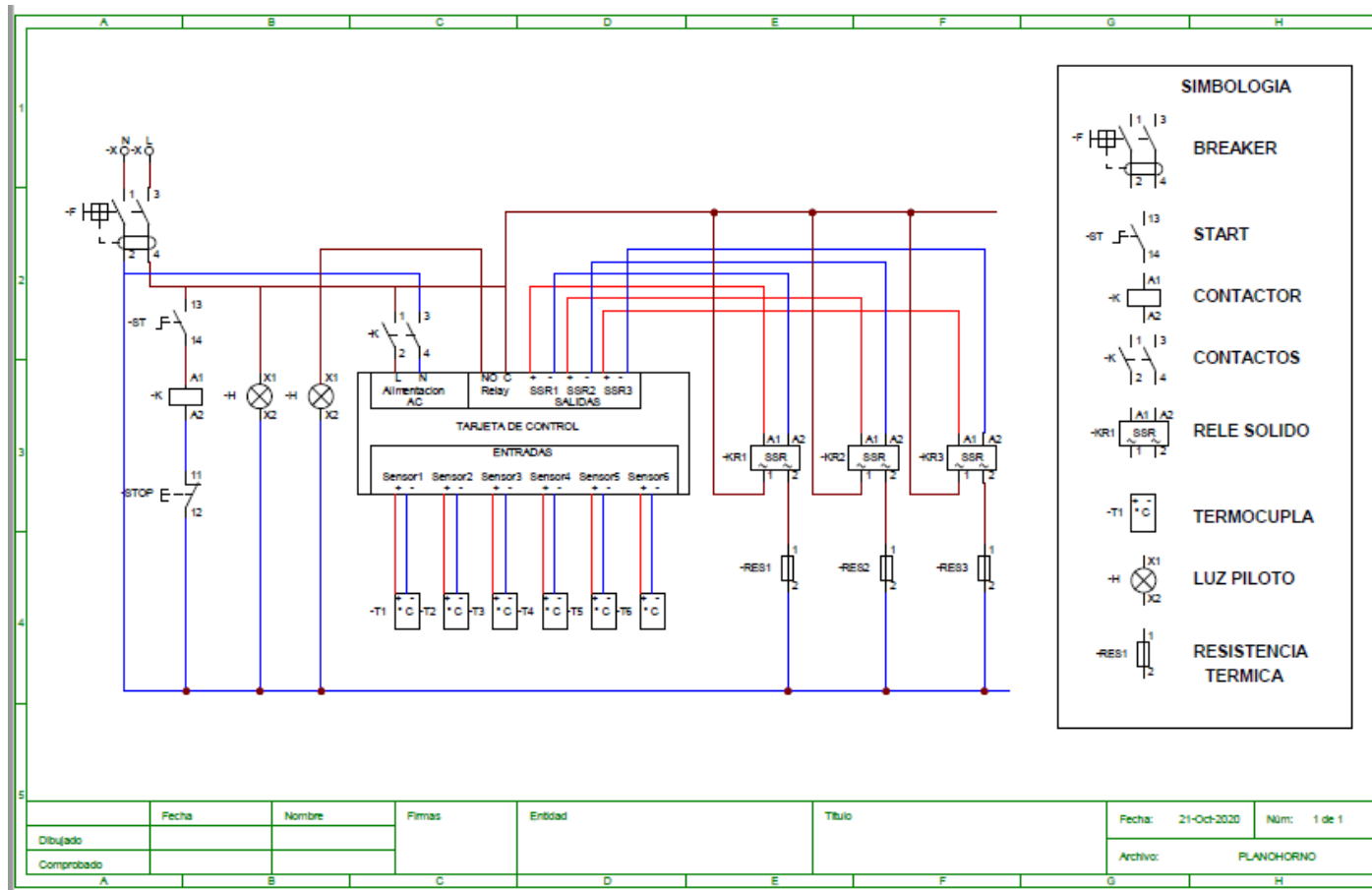


Figura 40-3. Circuito eléctrico del banco didáctico de instrumentación.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.14.1. Diseño de la placa de control.

Para el proceso de diseño e impresión de la placa de control del sistema se utilizó el programa EAGLE el cual es un software CAD que sirve para diseño e implementación en placas impresas PCB, dicha placa se diseñó tomando en cuenta las necesidades de la maquina y sus componentes se detallan en la tabla 31-3.

Tabla 31-3. Componentes incluidos en la placa de control.

PINES CONECTADOS		
# ITEM	NUMERO DE PIN	DESCRIPCIÓN
1	0	CONEXIÓN RX HACIA RASPBERRY
2	1	CONEXIÓN TX HACIA RASPBERRY
3	2	CONEXIÓN CS MAX31856 TERMOCUPLA J
4	3	CONEXIÓN RELE ESTADO SOLIDO 1
5	4	CONEXIÓN CS MAX31856 TERMOCUPLA J
6	5	CONEXIÓN RELE ESTADO SOLIDO 2
7	6	CONEXIÓN RELE ESTADO SOLIDO 3
8	7	CONEXIÓN CS MAX31856 TERMOCUPLA K
9	8	CONEXIÓN CS MAX31856 TERMOCUPLA K
10	9	CONEXIÓN CS MAX31856 TERMOCUPLA T
11	10	CONEXIÓN CS MAX31856 TERMOCUPLA T
12	11	CONEXIÓN SDO MAX31856
13	12	CONEXIÓN SD1 MAX31856
14	13	CONEXIÓN SCK MAX31856
15	14 o A0	MODULO RELE
16	15 o A1	SIN CONECTARSE
17	16 o A2	SIN CONECTARSE
18	17 o A3	SIN CONECTARSE
19	18 o A4	SIN CONECTARSE
20	19o A5	SIN CONECTARSE
21	20 o A6	SIN CONECTARSE
22	21 o A7	SIN CONECTARSE

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

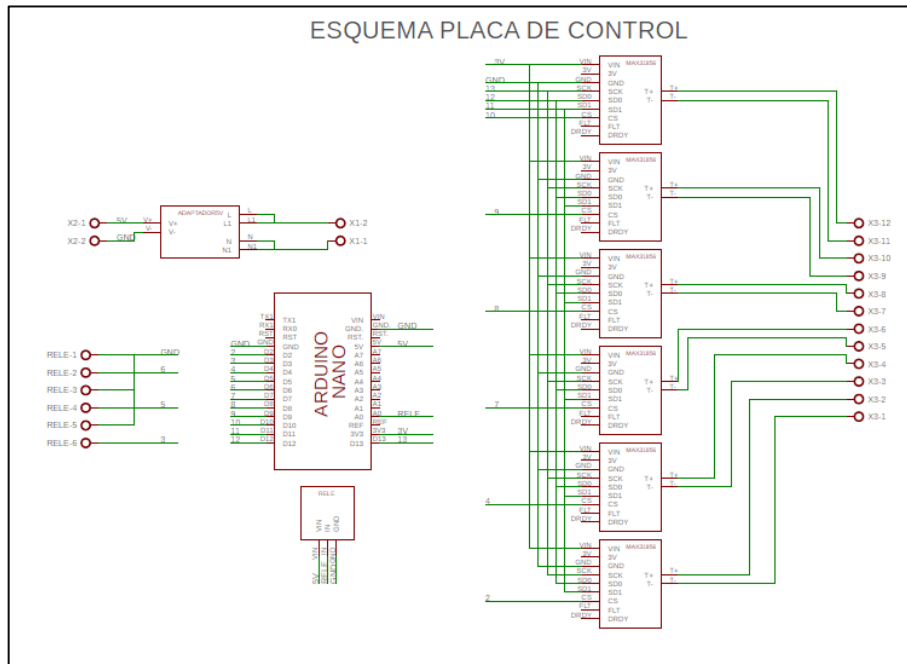


Figura 41-3. Esquema de la placa de control.
 Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

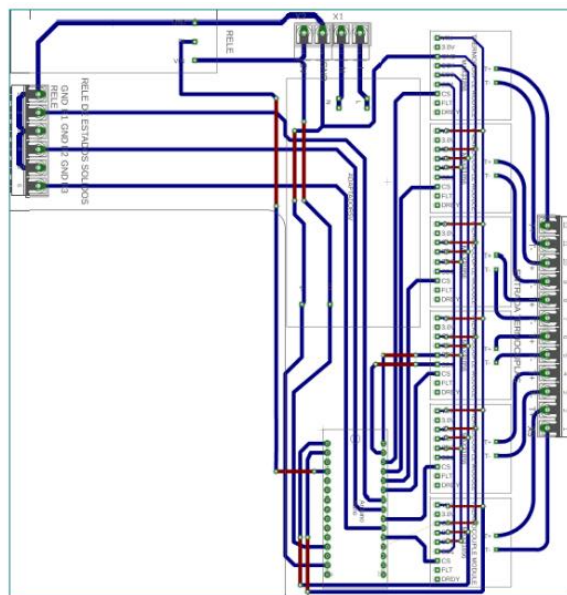


Figura 42-3. Placa PCB.
 Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

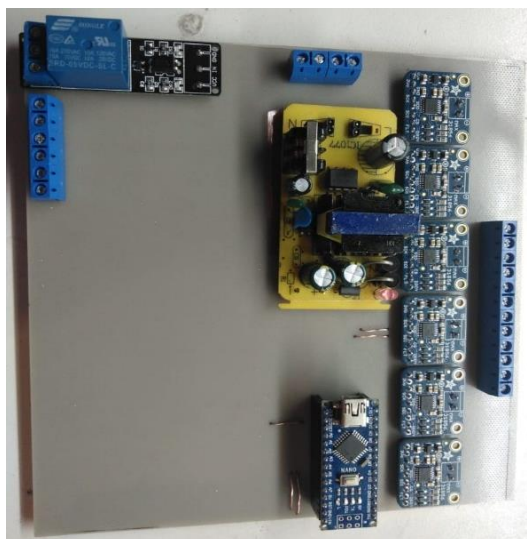


Figura 43-3. Placa de control final.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.15. Sistema Operativo de la placa Raspberry.

Previo la utilización del microprocesador que se utilizara en el proceso (Raspberry) este debe estar precargado por el sistema operativo a utilizarse, en este caso se optó por el Sistema operativo propio de Raspberry denominado RASPBERY PI OS y para la instalación de dicho sistema operativo en la tarjeta de memoria se utilizó la herramienta NOOBS (New Out Box Software).



Figura 44-3. Herramienta NOOBS

Fuente: (Raspberry Pi Foundation, 2020)

3.15.1. Instalación de NOOBS.

NOOBS es un sencillo instalador de sistema operativo que incluye precargados Raspberry Pi OS y LibreELEC además de otros sistemas descargables extras. Esta aplicación debe ser descargada de la página web oficial de Raspberry y existe dos variantes existentes: NOOBS y NOOBS LITE, con la diferencia que NOOBS LITE no tiene ningún Sistema Operativo precargado.

Una vez se tiene el archivo de NOOBS descargado se instala en la tarjeta MicroSD que se insertará en la placa Raspberry, para esto requiere de una Pc con lector de tarjetas micro SD y una aplicación que sirva para formatear la SD, en este caso se utilizó el programa SD Car Formatter, el cual tras ejecutarse, formatea la SD , finalmente se descomprime el archivo zip descargado en la memoria MicroSD formateada.

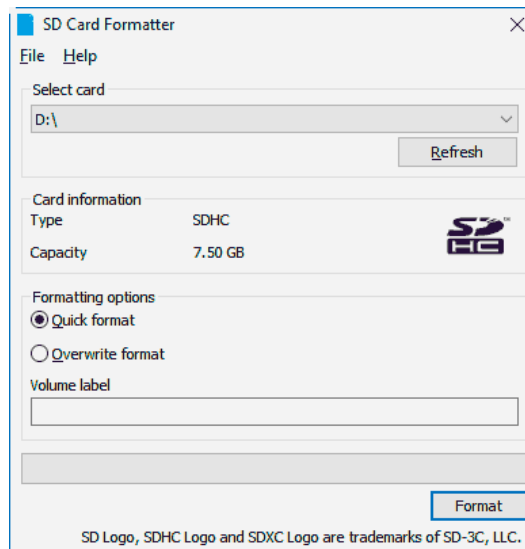


Figura 45-3. SD Card Formatter

Realizado por: Arias, P., Guerrero G., 2020

Una vez instalado NOOBS, instalar un sistema operativo es muy sencillo. Se introduce la tarjeta de memoria en el Raspberry Pi y se enchufa a la corriente. Al iniciar aparece un menú con los distintos sistemas operativos disponibles. Se elige el sistema deseado en este caso RASBPERRY PI OS y se presiona la tecla 'I' para instalarlo.

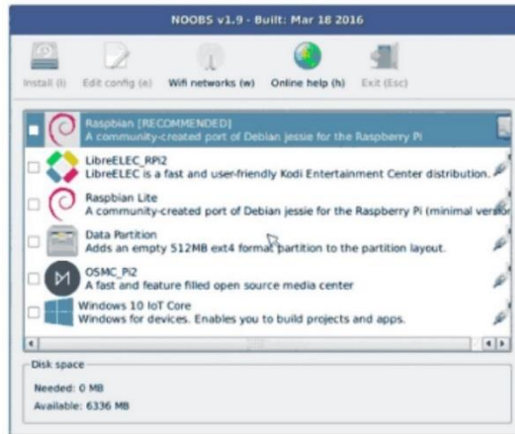


Figura 46-3. NOOBS ejecutándose en el Raspberry Pi
Realizado por: Arias, P., Guerrero G., 2020.

Luego de seleccionar, se debe esperar a que se instale por completo el sistema operativo en la memoria, y una vez finalizado el proceso, se hace click en el botón que reinicia la Pi. Una vez que se reinicia aparecerá la pantalla de inicio de RASBPERRY PI OS.



Figura 47-3. Pantalla de inicio de RASBPERRY PI OS.
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.15.2. Librerías de Python.

Como se había determinado con anterioridad, para el desarrollo del prototipo específicamente en la parte de programación se ha seleccionado el lenguaje de programación Python, haciendo uso

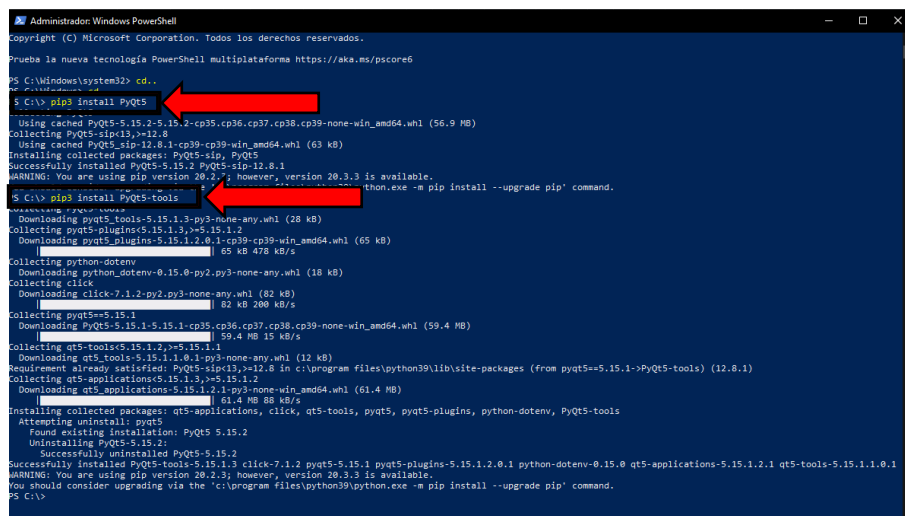
de una de sus principales ventajas la cual es la inclusión de librerías adicionales para el desarrollo optimo del proyecto, las principales utilizadas en este caso específico serán:

- Qt designer.
- Pyserial.

3.15.2.1. Instalación Qt designer.

El proceso de instalación de librerías en Python se realiza a través de la ventana de comandos del sistema, para la instalación e Qt designer hay que dirigirse a la carpeta donde se instaló Python y buscar Lib/site-packages y desde esa dirección ejecutar como administrador el símbolo del sistema (CMD) donde se debe introducir los siguientes comandos:

- pip3 install PyQt5.
- pip3 install PyQt5-tools.



```
Administrator: Windows PowerShell
Copyright (C) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.
Prueba la nueva tecnología PowerShell multiplataforma https://aka.ms/pscore6

PS C:\Windows\system32> cd..
PS C:\> pip3 install PyQt5
Using cached PyQt5-5.15.2-5.15.2-cp35-cp36-cp37-cp38-cp39-none-win_amd64.whl (56.9 MB)
Collecting PyQt5-sip<13,>=12.8
Using cached PyQt5_sip-12.8.1-cp39-cp39-win_amd64.whl (63 kB)
Installing collected packages: PyQt5-sip, PyQt5
Successfully installed PyQt5-5.15.2 PyQt5-sip-12.8.1
WARNING: You are using pip version 20.2.7; however, version 20.3.3 is available.
You should consider upgrading via the 'python.exe -m pip install --upgrade pip' command.

PS C:\> pip3 install PyQt5-tools
Collecting pyqt5-tools<5.15.1.3-py3-none-any.whl (28 kB)
Collecting pyqt5-plugins<5.15.1.3,>=5.15.1.2
Downloading pyqt5_plugins-5.15.1.2.0.1-cp39-cp39-win_amd64.whl (65 kB)
65 kB 478 kB/s
Collecting python-dotenv
Downloading python_dotenv-0.15.0-py2.py3-none-any.whl (18 kB)
Collecting click
Downloading click-7.1.2-py2.py3-none-any.whl (82 kB)
82 kB 200 kB/s
Collecting pyqt5=5.15.1
Downloading PyQt5-5.15.1-5.15.1-cp35-cp36-cp37-cp38-cp39-none-win_amd64.whl (59.4 MB)
59.4 MB 15 kB/s
Collecting qt5-tools<5.15.1.2,>=5.15.1.1
Downloading qt5_tools-5.15.1.1.0.1-py3-none-any.whl (12 kB)
Requirement already satisfied: PyQt5-sip<13,>=12.8 in c:\program files\python39\lib\site-packages (from pyqt5=5.15.1->PyQt5-tools) (12.8.1)
Collecting qt5-applications<5.15.1.3,>=5.15.1.2
Downloading qt5_applications-5.15.1.2.1-py3-none-win_amd64.whl (61.4 MB)
61.4 MB 88 kB/s
Installing collected packages: qt5-applications, click, qt5-tools, pyqt5, pyqt5-plugins, python-dotenv, PyQt5-tools
Attempting uninstall: pyqt5
Found existing installation: PyQt5 5.15.2
Uninstalling PyQt5-5.15.2:
Successfully uninstalled PyQt5-5.15.2
Successfully installed PyQt5-tools-5.15.1.3 click-7.1.2 pyqt5-5.15.1 pyqt5-plugins-5.15.1.2.0.1 python-dotenv-0.15.0 qt5-applications-5.15.1.2.1 qt5-tools-5.15.1.1.0.1
WARNING: You are using pip version 20.2.7; however, version 20.3.3 is available.
You should consider upgrading via the 'c:\program files\python39\python.exe -m pip install --upgrade pip' command.
PS C:\>
```

Figura 48-3. Instalación Qt en el CMD.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

Al terminal el proceso de instalación se tendrá una aplicación llamada Designer, en la cual se puede crear la aplicación grafica como si fuera un lenguaje orientado a objetos (botones, tablas, labels, etc.), estos componentes como cualquier otro lenguaje tendrán una ID y una acción las cuales pueden ser tomadas desde el programa en Python.

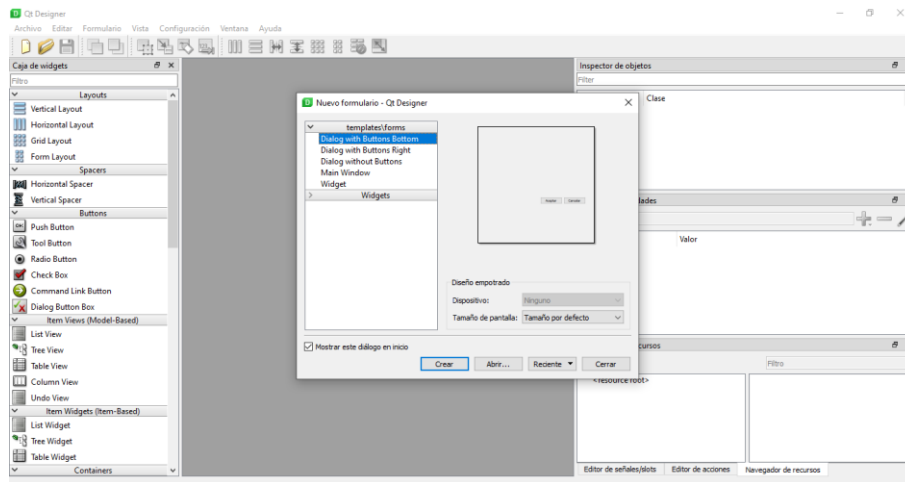


Figura 49-3. Pantalla Qt Designer.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.15.2.2. Instalación Pyserial.

Esta librería es la encargada de la comunicación serial de la Raspberry con el Arduino trabajando como esclavo, esta librería básicamente se envía los parámetros para el control de temperatura y recibe la temperatura del sensor patrón y el voltaje medido del sensor para calibración.

El proceso de instalación de PySerial será exactamente el mismo que el de la librería QtDesigner, es decir, directamente desde el administrador el símbolo del sistema (CMD) solo que esta vez con el siguiente comando:

- pip3 install PySerial

3.16. Librerías de Arduino

La aplicación que se encarga de la programación del Arduino Nano es el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) de Arduino, el cual trabaja con el lenguaje de programación JAVA. El cual además posee compatibilidad con placas de otros desarrolladores por lo cual también ofrece librerías necesarias para la integración del módulo acondicionador MAX31856.

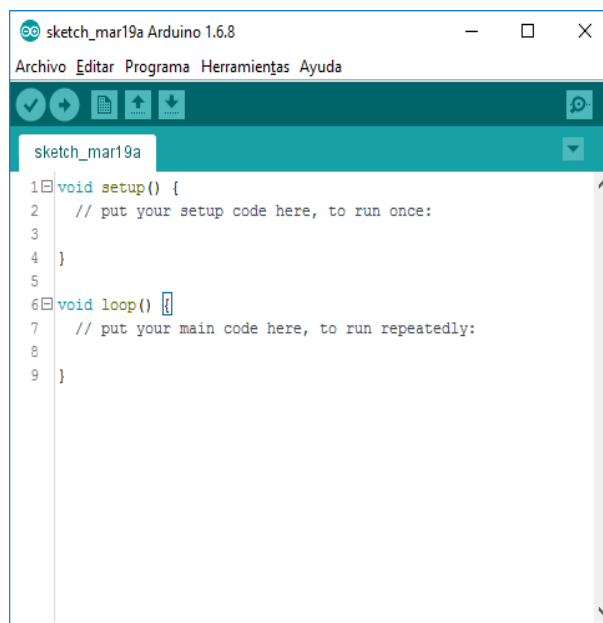


Figura 50-3. IDE de Arduino.
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

Para la instalación de la librería correspondiente al módulo MAX31856 se tiene que buscar desde el administrador de la biblioteca de Arduino como: “adafruit max31856”

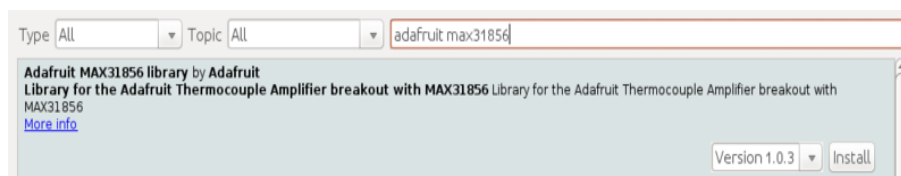


Figura 51-3. Librería del modulo MAX31856.
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.17. Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario.

Para el desarrollo de la interfaz gráfica de control a la que el usuario tendrá acceso se utilizó la herramienta QTDesigner, desde la cual se diseñaron pantallas, la primera pantalla, de Menú Principal, funcionara únicamente como una pantalla de presentación y selección desde la cual se podrán acceder mediante botones a las dos pantallas de acción, las cuales se detallaran posteriormente y son:

- Pantalla Panel de configuración.
- Pantalla Toma de Datos.



Figura 52-3. Pantalla menú principal.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.17.1. Pantalla de configuración.

La pantalla correspondiente al panel de configuración será la encargada de recoger los datos proporcionados por el sistema, así como la disposición de intercomunicación, además de las configuraciones que el Usuario necesite precargar al sistema, según los requerimientos del procedimiento de laboratorio.

La pantalla de configuración posee los siguientes componentes:

- Puerto: Es el campo donde se asigna el correspondiente puerto COM destinado a Arduino.
- Temperaturas: Al iniciar la comunicación este apartado proporciona la temperatura actual de las etapas del horno.
- Conectar: Inicia la comunicación serial entre la Raspberry y el Arduino Nano colocado como esclavo.
- Cargar Config: Este botón se encarga de agrupar toda la información tanto de ecuaciones características y parámetros para el control PID de temperatura.
- Regresar: Presionar este icono dirige al usuario nuevamente al menú principal.
- Activar control PID: Habilita los parámetros K_p , T_i , T_d para el control PID.
- Limpiar: Limpia todos los campos que el usuario haya llenado.

- Ec. Característica: En dichos paneles se pueden ingresar las ecuaciones características obtenidas, cabe recalcar que si se las modifica también se guardan en un archivo independiente.
- Parámetros PID: en estos campos se configura los parámetros K_p, T_i, T_d para el control PID de temperatura.

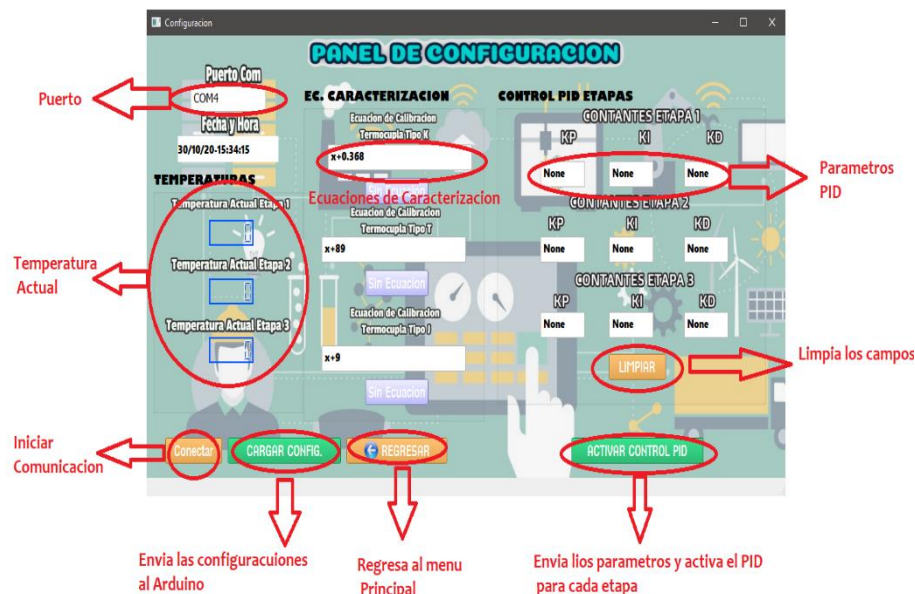


Figura 53-3. Pantalla de Configuración.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.17.2. Pantalla Toma de Datos.

Para la pantalla de toma de datos, tiene los siguientes componentes:

- Puerto COM: Indica el puerto de comunicación asignado previamente en la pantalla de configuración.
- Gráfica Temperatura: Grafica los valores de Temperatura (T) vs voltaje (V) obtenidos desde la comunicación del Arduino y la Raspberry
- Regresar: Retorna al menú principal
- Set Point: En esta sección se especifican los valores de temperatura que el usuario desea establecer. Si el usuario no coloca ningún valor el sistema lo toma como etapa desactivada.
- Panel de Control: Esta sección esta constituida los siguientes botones de accion:

- Iniciar: Inicia la toma de datos recibidas desde el Arduino
 - Detener: Detiene la toma de datos.
 - Limpiar: Limpia los campos, tablas, gráficos etc.
 - Guardar: Almacena toda la información de las tablas obtenidas en un Archivo con formato .txt .
- Tabla de Datos: En este campo se muestran los datos de Voltaje y Temperatura en forma de tablas independientes por cada etapa del horno.

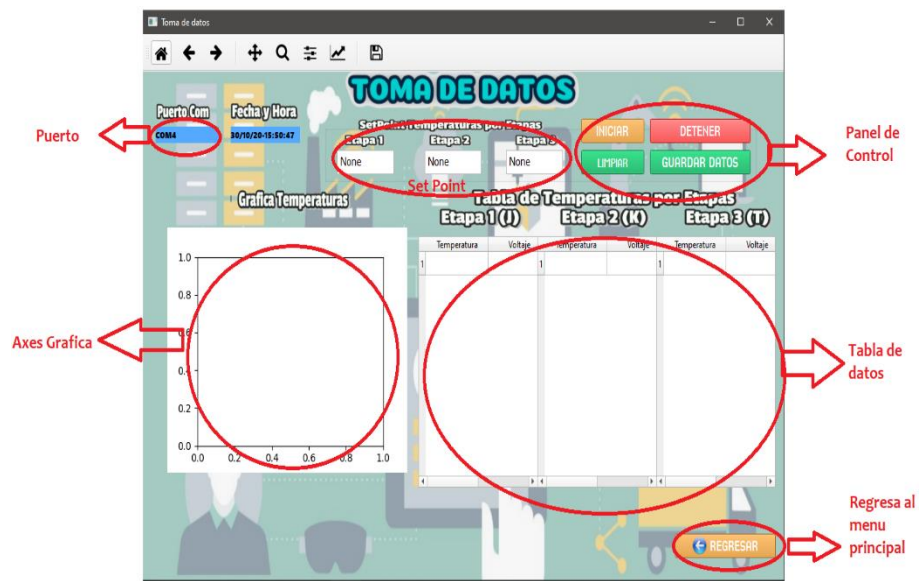


Figura 54-3. Pantalla Toma de Datos.
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

3.17.3. Programación grafica del sistema.

El funcionamiento del sistema está basado en el diagrama de la Figura 55-3

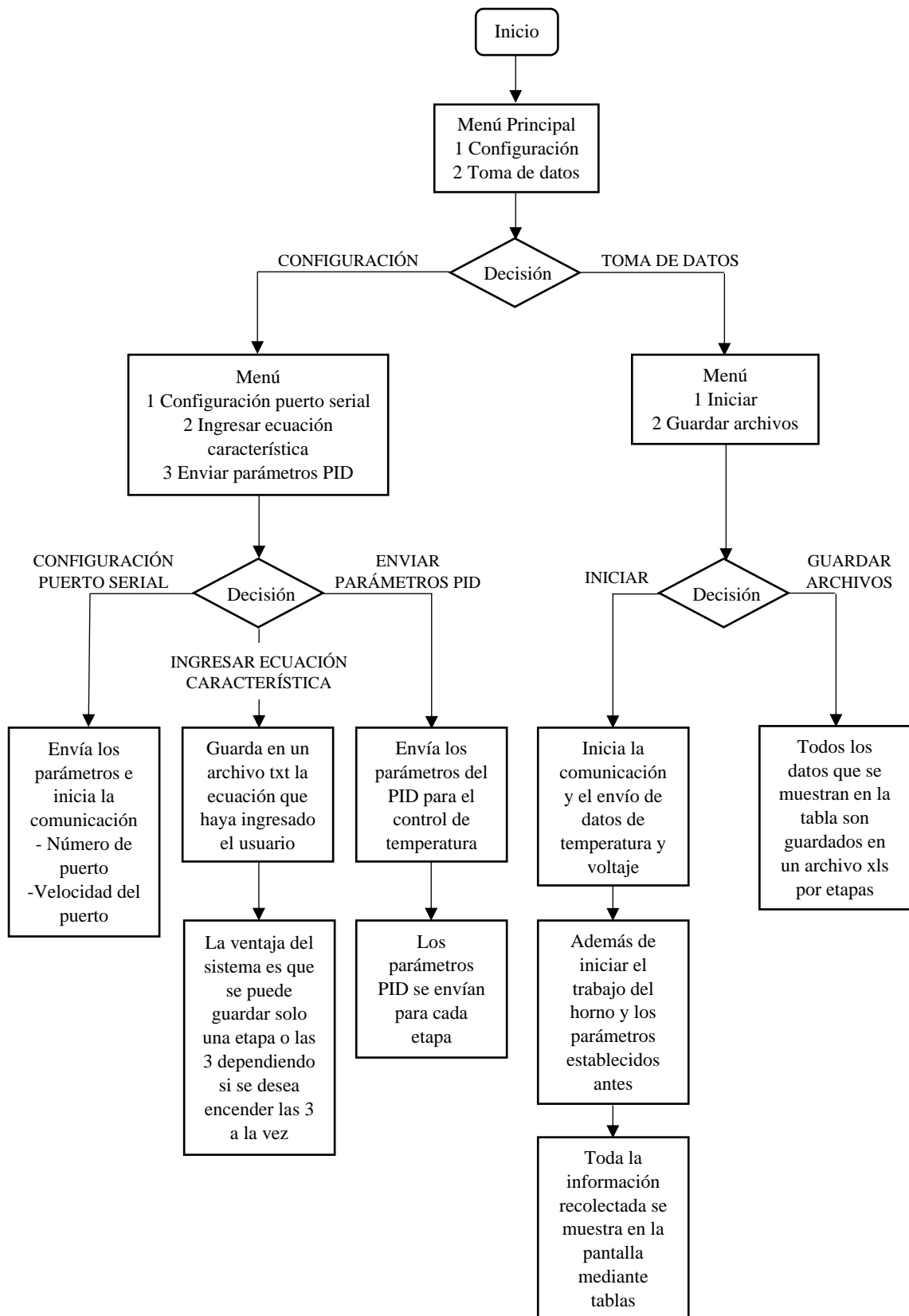


Figura 55-3. Diagrama de Flujo del Sistema de control.

Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

En este diagrama se indica que el sistema posee en su estructura un Menú principal con 2 elementos para seleccionar; Menú de configuración del sistema y Toma de datos.

Si se selecciona el Menú de configuración, el usuario tiene la posibilidad de escoger el nombre del puerto COM del Arduino nano (éste por defecto ya viene establecido con un nombre fijo), además debe configurar si desea activar el control PID para la etapa de calentamiento del horno o no. Si oprime Activar se desbloquearán los campos de parámetros en los cuales el usuario debe de colocar todas las constantes para las tres etapas, haciendo el sistema independiente de cada etapa.

Existe también un campo donde el usuario ingresa la ecuación característica de cada etapa, cabe especificar que esta ecuación es obtenida por el estudiante mediante la caracterización del sistema a partir de los datos proporcionados por el mismo programa.

Una vez configurado todos los parámetros que el estudiante o usuario necesiten se procede a CARGAR la configuración al microcontrolador además de guardar las ecuaciones en un archivo txt, para utilizarlo en la pantalla “Toma de Datos”.

Al seleccionar el menú de Toma de datos, todos los datos configurados en el menú previo se cargarán al momento de iniciar la pantalla, el usuario únicamente debe de ingresar los datos de temperatura que desea en cada etapa e INICIAR la prueba, los datos se acumularán y se mostrara en tablas independientes para cada etapa del horno, el usuario determinara según sus necesidades el tiempo de detener la prueba y guardar los datos.

Estos datos serán utilizados para que el usuario los analice y calcule la curva característica de cada sensor.

3.17.4. Programación grafica del Microcontrolador.

La programación del microcontrolador Arduino se expone en el diagrama de la Figura 56-3

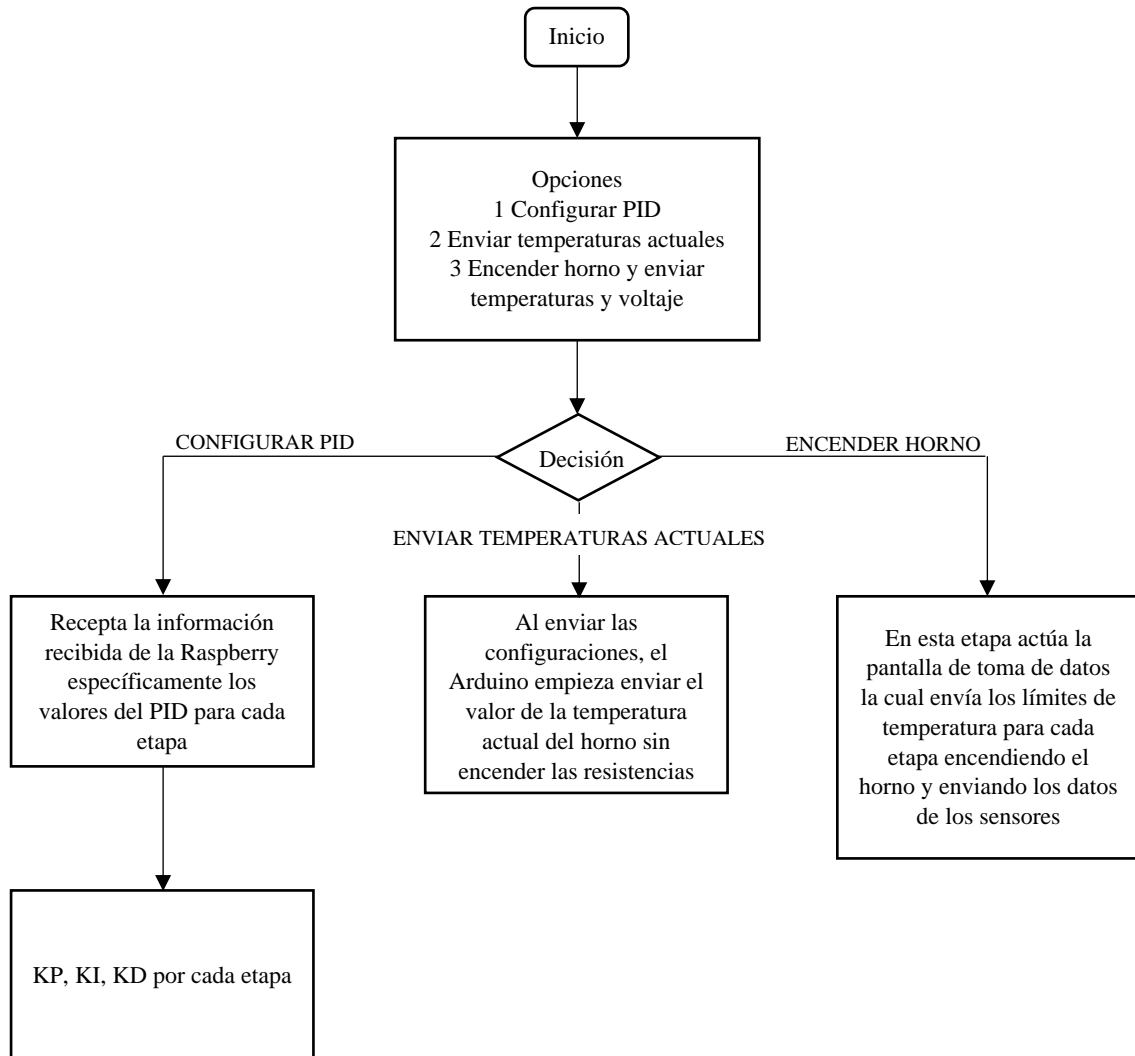


Figura 56-3. Diagrama de Flujo del Microcontrolador.
Realizado por: Arias, P., Guerrero, G., 2020.

El diagrama de flujo indica que posee 3 funciones principales:

- Configurar PID: Funciona al momento de enviar las configuraciones al sistema, enviando los parámetros de control del PID para el control de temperatura automático.
- Enviar Configuraciones Actuales: Envía los datos de temperatura de las cámaras del horno sin encender las resistencias solo para comprobar si los sensores madres funciona adecuadamente.
- Encender el Horno y Enviar datos de Temperatura y Voltaje: Envía los Set Point de cada etapa y enciende las resistencias controladas por el PID para llegar a dichas temperaturas, además de recoger los datos de Temperatura y Voltaje de cada etapa.

3.18. Construcción y Montaje del banco.

3.18.1. Método de construcción.

Las máquinas utilizadas en la fabricación del banco de calibración y control de un horno de 3 etapas, se especificarán en la Tabla 32-3.

Tabla 32-3. Máquinas usadas en la fabricación del banco.

Máquinas
Sierra cortadora de metal
Dobladora de metal
Soldadora eléctrica
Taladro

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Las herramientas utilizadas en la fabricación también se enlistan en la Tabla 33-3.

Tabla 33-3. Herramientas utilizadas en la fabricación.

Herramientas
Flexómetro
Escuadra
Amoladora
Desarmadores

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.18.1.1. Construcción de los componentes del banco.

A continuación, en la Tabla 34-3 se detallan los materiales utilizados en la construcción de los componentes del banco didáctico.

Tabla 34-3. Materiales de los componentes del banco didáctico.


Componente	Material
Estructura del soporte del banco	Perfil L Acero Inoxidable 304 Lados iguales 20 x 2 x 6000 mm
Horno	Acero inoxidable AISI 304 1220 x 2440 x 2 mm
Etapas del horno	Tubería Acero inoxidable AISI 304 3 m de largo 2 in de espesor
Tablero de control	Prefabricado comercial

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.18.1.2. Operaciones y tiempos de construcción para la estructura de soporte.

Todas las operaciones realizadas para la construcción de la estructura del soporte con sus tiempos respectivos se detallan en la Tabla 35-3.

Tabla 35-3. Operaciones y tiempos para la construcción de la estructura del soporte.


Estructura de soporte			
Componente	N.º	Operación	Tiempo (min)
Base del tablero de control	1	Toma de medidas de la plancha de acero	60
	2	Corte del material	30
Soporte del horno	3	Toma de medidas del perfil L	60
	4	Corte del material	30
	5	Soldado	60
Apoyo del banco	6	Toma de medidas del tubo y el perfil L	40
	7	Doblado de tubo	30
	8	Soldado	60
Estructura completa	9	Soldado de base del tablero con soporte del horno	60
	10	Soldado del apoyo del banco con base del tablero	40
	11	Soldado de ruedas	60
	12	Pulido	60
	13	Limpieza	30
	14	Pintado	120

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.18.1.3. Operaciones y tiempos de construcción para el horno de 3 etapas.

El horno está formado de un armazón que contiene las 3 etapas cilíndricas de medidas idénticas, las operaciones de construcción del armazón y las etapas son detalladas a continuación en la Tabla 36-3 con sus tiempos respectivos.

Tabla 36-3. Operaciones y tiempos de construcción del horno de 3 etapas.


Horno de 3 etapas			
Componente	N.º	Operación	Tiempo (min)
Armazón del Horno	1	Toma de medidas de la plancha de acero	60
	2	Corte del material	40
	3	Doblado del material	60
	4	Soldado	60
	5	Pulido	60
	6	Taladrado	30
Etapas	7	Toma de medidas del tubo de acero inoxidable	60
	8	Corte del material	40
	9	Soldado	60
	10	Pulido	60
	11	Taladrado	30
	12	Implementación del aislante	120
Horno completo	13	Unión con pernos	30
	14	Limpieza	60
	15	Rotulado	40

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.18.1.4. Operaciones y tiempo del armado del tablero de control.

Para el armado completo del tablero, se organizaron los dispositivos eléctricos y electrónicos de una manera sistemática con las operaciones y tiempos detallados en la Tabla 37-3.

Tabla 37-3. Operaciones y tiempos del armado del tablero.

Tablero de control			
Componente	N.º	Operación	Tiempo (min)
Placa de control	1	Diseño de la placa	300
	2	Grabado y corte de la placa	240
Tablero de control	3	Ensamble del sistema eléctrico y electrónico dentro del tablero	480
	4	Cableado	180
	5	Aseguramiento de las termocuplas en las etapas del horno	60

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.18.2. Montaje del banco didáctico.

A continuación, en la Tabla 38-3 se indican los tiempos del montaje de cada uno de los componentes del banco didáctico para realizar el ensamblaje final y verificar su funcionamiento.

Tabla 38-3. Montaje del banco didáctico.

Sistema	Operación	Símbolo	Tiempo (min)
Estructural	Montaje del horno al soporte	M1	60
Control	Montaje del tablero de control	M2	180
	Montaje de dispositivos de control	M3	120
	Implementación de la programación	M4	3840

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.18.2.1. Diagrama de flujo del montaje del banco didáctico.

El diagrama detallado del montaje del banco didáctico es mostrado en la Figura 57-3.

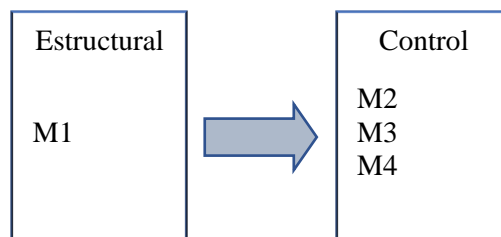


Figura 57-3. Diagrama de flujo del montaje del banco didáctico.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.18.3. Tiempo total de construcción y montaje del banco didáctico.

En la Tabla 39-3, se muestra el tiempo total de construcción y montaje del banco didáctico.

Tabla 39-3. Tiempo total de construcción y montaje del banco didáctico.

Etapas	Tiempo (min)	Tiempo (horas)	Tiempo (días)
Etapa de construcción	2810	46,83	5,85
Etapa de montaje	4200	70	8,75
Total	7010	116,83	14,60

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

El tiempo total de construcción del banco didáctico es de 3 semanas, asumiendo 8 hora laborables por día y 5 días de trabajo a la semana.

3.19. Operación y funcionamiento del banco didáctico.

3.19.1. Manual de operación del banco.

El manual de operación es fundamental para el manejo del banco, ya que brinda las pautas necesarias para el uso correcto y seguro del equipo.

Tabla 40-3. Especificaciones técnicas del banco didáctico.

<p>Banco didáctico de instrumentación para la calibración de los termopares tipo j, k & t, y control de un horno de tres etapas</p>			
		<p>Propiedades Generales</p>	
Alto	130 cm	Temperatura máxima	500°C
Ancho	43 cm	Voltaje	110 V
Largo	41,5 cm	Tipo de termopares	J, K, T
Estructura	Perfil L Hierro	Funcionamiento	Automática
Interfaz	Python	Peso	50kg

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

3.19.1.1. Instrucciones de funcionamiento del banco.





Antes de encender el equipo se debe tener las siguientes consideraciones:

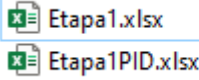

- Verificar que todas las termocuplas se encuentren bien acopladas al horno.
- Que el módulo del horno se encuentre despejado.

- Comprobar que todas las conexiones dentro del tablero se encuentren correctamente.
- Verificar que las conexiones de las interfaces de entrada y salida (Monitor y mouse) sean correctas.
- En caso de no utilizar estas interfaces comprobar que la red inalámbrica con la que se configuró el banco se encuentre encendida.
- Revisar que al conectar el equipo solo se encienda la luz led correspondiente al sistema de control (verde), y la del horno (Roja) se mantenga apagada.

Concluida la revisión de todos los puntos mencionados, se detallan todos los pasos para dar inicio el funcionamiento del equipo.

Tabla 41-3. Instrucciones de funcionamiento del equipo.

Instrucciones	Funcionamiento
Conectar el equipo a 110 V	
Comprobar que el paro de emergencia este desactivado	
Encender el equipo y comprobar que el led verde esté prendido.	
Iniciar la interfaz de usuario en VNC Viewer	
Establecer los parámetros de las etapas y encender el horno, verificar que el led rojo esté encendido	

Al terminar la práctica todos los datos son exportados en un archivo Excel	
Terminada la práctica se apaga el equipo	

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

Tabla 42-3. Relación de temperatura patrón y voltaje medido de termopar a prueba.

TIEMPO	TEMPERATURA	VOLTAJE
11/01/21-12:51:02	46.01	2.64
11/01/21-12:51:03	46.03	2.63
11/01/21-12:51:04	46.07	2.63
11/01/21-12:51:05	46.13	2.63
11/01/21-12:51:06	46.08	2.63
11/01/21-12:51:07	46.11	2.63
11/01/21-12:51:09	46.13	2.63
11/01/21-12:51:10	46.16	2.63
11/01/21-12:51:11	46.22	2.63
11/01/21-12:51:12	46.27	2.64
11/01/21-12:51:13	46.28	2.65
11/01/21-12:51:14	46.52	2.65
11/01/21-12:51:15	46.61	2.66

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Tabla 43-3. Cálculo de la temperatura con el voltaje medido y control PID del horno.

TIEMPO	TEMPERATURA	VOLTAJE	TEMPERATURA_CAL
11/01/21-13:	42.2	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.3	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.31	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.28	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.28	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.38	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.4	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.38	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.47	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.51	2.4	41.7772368
11/01/21-13:	42.59	2.4	41.7772368
11/01/21-13:	42.78	2.41	41.977406842200004

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

3.19.2. Manual de mantenimiento del banco didáctico.

El plan de mantenimiento del banco didáctico se detalla a continuación en la Tabla 44-3.

Tabla 44-3. Mantenimiento preventivo del banco didáctico.

Plan de mantenimiento preventivo del banco didáctico					
Elemento	Actividad	Realizó	Tiempo	Frecuencia	Observaciones
Estructura del soporte	Limpieza	Operario	10 min	Semanal	Limpiar el soporte para evitar la acumulación de polvo
Termopares	Ajuste de roscas	Operario	5 min	Quincenal	Asegurar los termopares en el horno
Aislante	Revisión	Operario	10 min	Semestral	Revisar que el aislante se encuentre en buen estado
Resistencias Eléctricas	Revisión	Operario	10 min	Semestral	Revisar que las resistencias funcionen correctamente
Electrónica	Revisión	Operario	5 min	Quincenal	Revisar que todos los dispositivos electrónicos se encuentren bien conectados
Tablero de Control	Revisión	Operario	5 min	Semanal	Revisar que todos los dispositivos de control en el tablero se encuentren bien conectados y en buen estado

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

3.20. Análisis de costos del banco didáctico.

Se especifican todos los costos tanto de los materiales, la mano de obra, dispositivos eléctricos y electrónicos utilizados en la fabricación del banco didáctico de instrumentación para la calibración de los termopares J, K, & T, y control de un horno de 3 etapas.

3.20.1. Costos directos.

Aquí se detallan todos los costos relacionados con la materia prima necesaria para la construcción del equipo.

Tabla 45-3. Costo de la parte mecánica para la construcción del equipo.

N.º	Materiales	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Perfil L Hierro 304 20 x 2 x 6000 mm	1	40	40
2	Plancha de Acero Inoxidable 304 1220 x 2440 x 2 mm	1	175	175
3	Tubo Acero Inoxidable 304 2 in x 2mm x 3m	1	40	40
4	Resistencia térmica de cuarzo 9 mm	3	50	150
5	Rollo de polietileno expandido con aluminio 1,2 m x 10 mm	1	30	30
6	Pernos M10	8	0,5	4
SUBTOTAL 1				439

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Tabla 46-3. Costo de los materiales eléctricos y electrónicos para el control del equipo.

N.º	Materiales	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Raspberry PI3 Modelo B+	1	75	75
2	Arduino nano	1	7	7
3	Mini cable USB robotics	1	3	3
4	Case Raspberry + ventilador + Disipadores	1	25	25
5	Cargador de Raspberry	1	10	10
6	Micro SD 16 GB clase 10	1	5	5
7	Distribuidor de voltaje	1	15	15
8	Relay de estado sólido	3	35	105
9	Breaker de 60A	1	30	30
10	Módulo Termocupla Max31856	6	25	150
11	Termocupla tipo J	2	35	70
12	Termocupla tipo K	2	35	70
13	Termocupla tipo T	2	35	70
14	Gabinete Metálico	1	50	50
15	Luces piloto indicadoras 120 – 220 V	2	4	8
16	Paro de emergencia	1	4	4
17	Selector dos posiciones	1	4	4

18	Hub USB	1	10	10
19	Extensión HDMI	1	12	12
20	Riel din	1	15	15
21	Bornera	1	5	5
22	Cable y canaleta	1	5	5
23	Fuente 5V 1A	1	15	15
24	Cable USB, HDMI, etc.	1	20	20
SUBTOTAL 2				783

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Tabla 47-3. Costo de desarrollo de la placa electrónica del equipo.

N.º	Materiales	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Impresión de placa	1	25	25
2	Implementación de la placa	1	25	25
SUBTOTAL 3				50

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Tabla 48-3. Costo de la mano de obra.

N.º	Mano de Obra	Valor/día	Días	Valor total
1	Mecánico	25	5	125
2	Eléctrico/Electrónico	30	12	360
SUBTOTAL 4				485

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Tabla 49-3. Costo del uso de equipos y herramientas.

N.º	Mano de Obra	Valor/Hora	Horas	Valor total
1	Disco de corte	1	2,5	2,5
2	Soldadora eléctrica	8	6	48
3	Amoladora	1	3	3
4	Taladro	1	0,5	0,5
SUBTOTAL 5				54

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

El total de los costos directos es el resultado de la suma de los gastos presentados en la Tabla 50-3.

Tabla 50-3. Total, de los costos directos del equipo.

Gastos	Valor
Subtotal 1	439
Subtotal 2	783
Subtotal 3	50
Subtotal 4	485
Subtotal 5	54
TOTAL	1811

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

3.20.2. Costos indirectos.

Los costos indirectos son aquellos que provienen de acciones o actividades realizadas en la fabricación del equipo, que son realmente importantes pero que no se pueden identificar o asociar con facilidad al producto final, en la Tabla 51-3 se muestran los valores de los costos indirectos del banco.

Tabla 51-3. Costos indirectos del banco didáctico.

N.º	Descripción	Valor unitario	Valor total
1	Ingenieriles	200	200
2	Utilidades	0	0
TOTAL			200

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Todo equipo con fines investigativos tiene un valor de 0 en utilidades.

3.20.3. Costo final del banco didáctico.

El costo final del banco didáctico es la suma de los costos directos e indirectos presentados en la fabricación del equipo, a continuación, en la Tabla 52-3 se especifica estos valores.

Tabla 52-3. Costo final del bando didáctico.

Gastos	Valor
Costos directos	1811
Costos indirectos	200
TOTAL	2011

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

El costo final para la fabricación de un prototipo del banco didáctico de instrumentación para la calibración de los termopares tipo j, k & t, y control de un horno de tres etapas, es de 2181 dólares americanos.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

El presente capítulo se centra en los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento, también explica el procedimiento de uso del banco y adicionalmente presenta las guías de laboratorio dirigidas hacia los estudiantes.

4.1. Pruebas de funcionamiento.

Una vez culminada la construcción y el montaje del equipo se procede a las pruebas de funcionamiento, con el fin de evaluar el desempeño y corregir posibles fallas que se presenten en el tiempo correspondiente a la práctica. La evaluación del equipo comienza con el encendido de los microcontroladores, la buena comunicación del equipo con el operador, el funcionamiento correcto de las resistencias para la elevación de la temperatura en cada una de las etapas, el botón de paro de emergencia en buen estado, la observación de la interfaz gráfica para establecer los parámetros de control del horno, y la adquisición de datos que es controlada por medio de Python en la Raspberry.

4.1.1. Pruebas preliminares del banco didáctico.

Para comprobar el funcionamiento correcto de los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos del banco didáctico de instrumentación antes de realizar las prácticas correspondientes, se han planteado los siguientes objetivos.

- Comprobar que el encendido funcione correctamente y que el led verde esté prendido.
- Verificar que la conexión del equipo con el operador sea estable.
- Asegurarse que los termopares se encuentren fijados correctamente y que el módulo del horno se encuentre despejado.
- Comprobar que todos los parámetros de temperatura y control se carguen correctamente.
- Verificar que los datos se guarden correctamente en un archivo de Excel.
- Comprobar que el paro de emergencia funcione

Tabla 1-4. Pruebas de funcionamiento antes de la práctica.

No.	Pruebas de funcionamiento	Criterio
1	Funcionamiento del sistema mecánico	El horno funciona de manera óptima y alcanza las temperaturas establecidas en cada etapa.
2	Funcionamiento del sistema electrónico	La comunicación del microcontrolador con los dispositivos electrónicos es correcta.
3	Funcionamiento del circuito eléctrico	Todos los componentes de control están en perfectas condiciones

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

4.1.2. Prueba de funcionamiento del banco didáctico de instrumentación.

A continuación, se detallan paso a paso una práctica para el funcionamiento del banco con todos los pasos a seguir, tomando en cuenta las verificaciones de todos los parámetros anteriores.

En caso de no utilizar monitor y mouse para el control del banco didáctico de instrumentación, es necesario configurar una red inalámbrica para el control remoto del mismo en dispositivos móviles (Laptops, celulares, etc.)

Para dicha configuración se hace uso del software libre “Advanced IP Scanner”, aplicación encargada de sincronizar la dirección IP del sistema Raspberry con la red inalámbrica disponible.

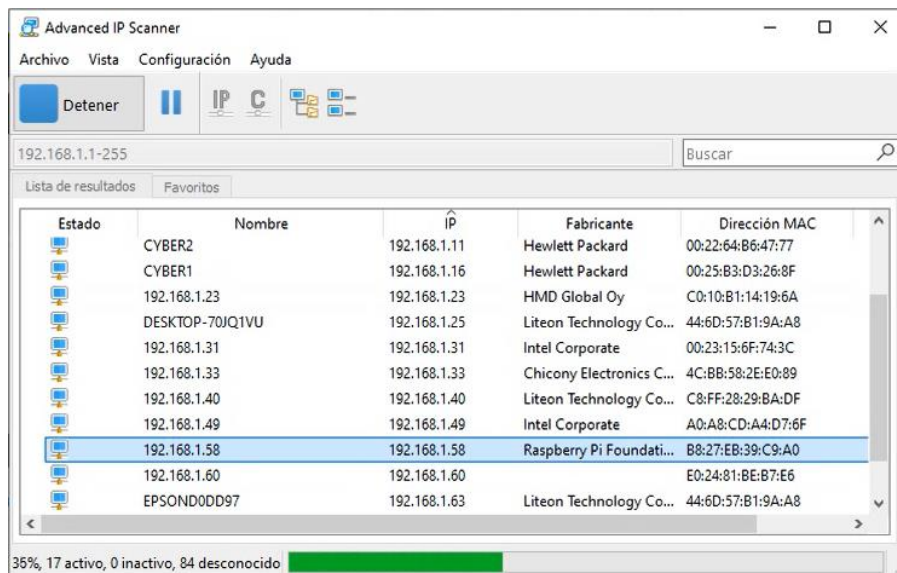


Figura 1-4. Software Advanced IP Scanner.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Una vez identificada la dirección IP de la Raspberry del equipo como se mostró en la Figura 1-4, se debe ingresar la dirección en el programa VNC Viewer como se muestra a continuación.

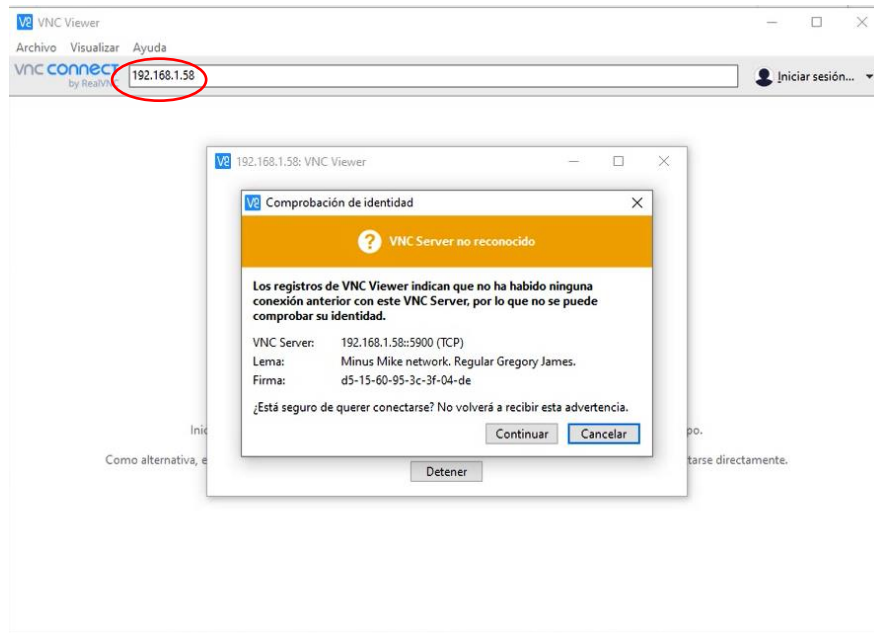


Figura 2-4. Ingreso de la dirección IP en el software VNC Viewer.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Aparecerá un mensaje de aprobación de identidad, click en continuar y ahora solicitará un usuario y contraseña, siendo estos ya predefinidos se coloca en Nombre de usuario: pi y en contraseña: 1234, como se muestra en la figura 3-4

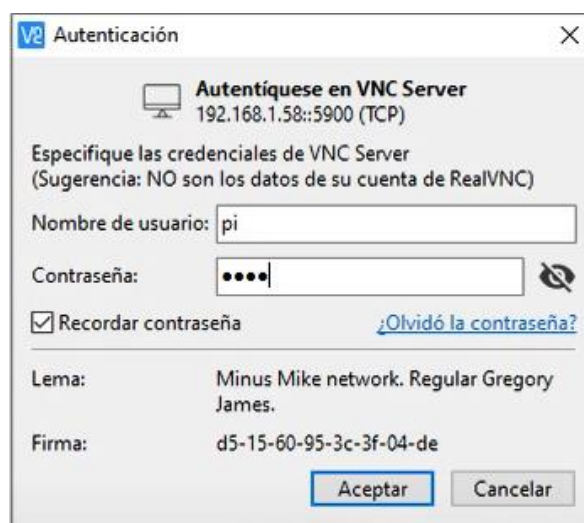


Figura 3-4. Usuario y contraseña para VNC.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Se abrirá una ventana con el sistema operativo de la Raspberry.

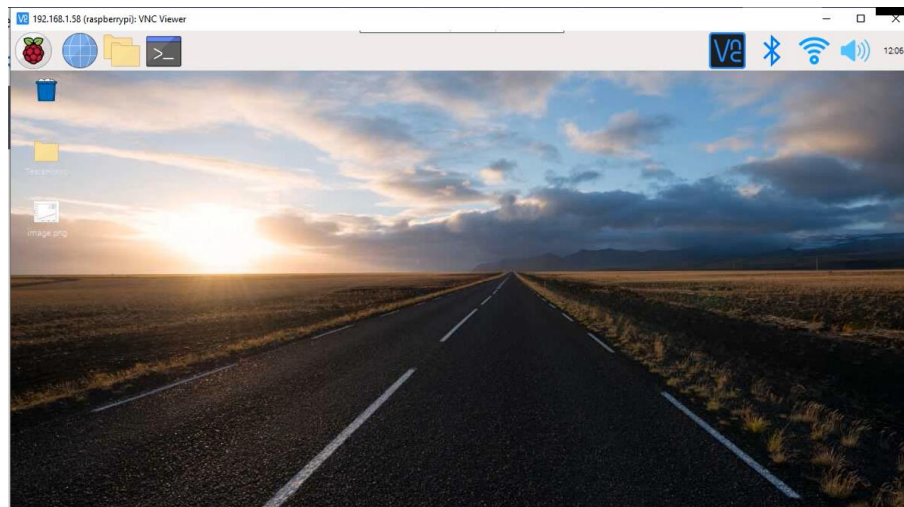


Figura 4-4. Ventana principal de la Raspberry.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Se ingresa a la carpeta llamada Tesis horno, y se abre la carpeta denominada código_python2.

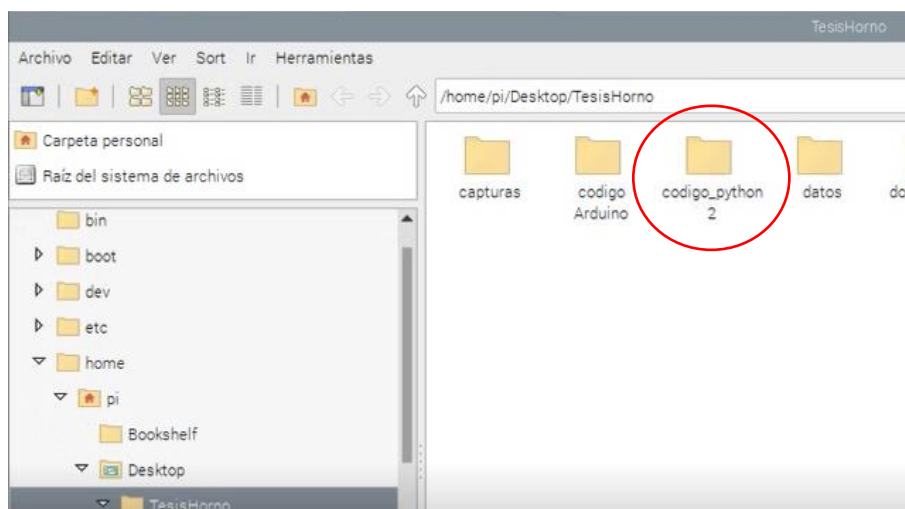


Figura 5-4. Selección de la carpeta código_python2.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Abrir el archivo guideHorno.py, y ejecutar el programa presionando run.

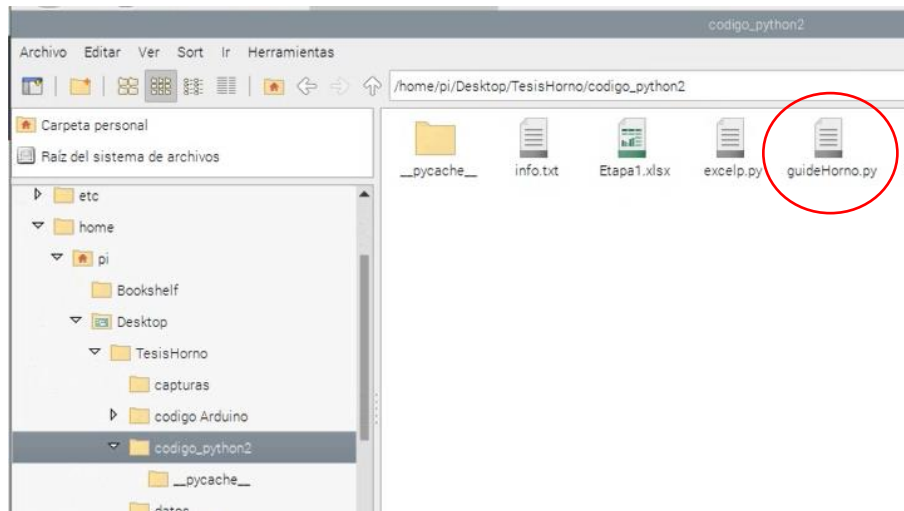


Figura 6-4. Selección del archivo guideHorno.py

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

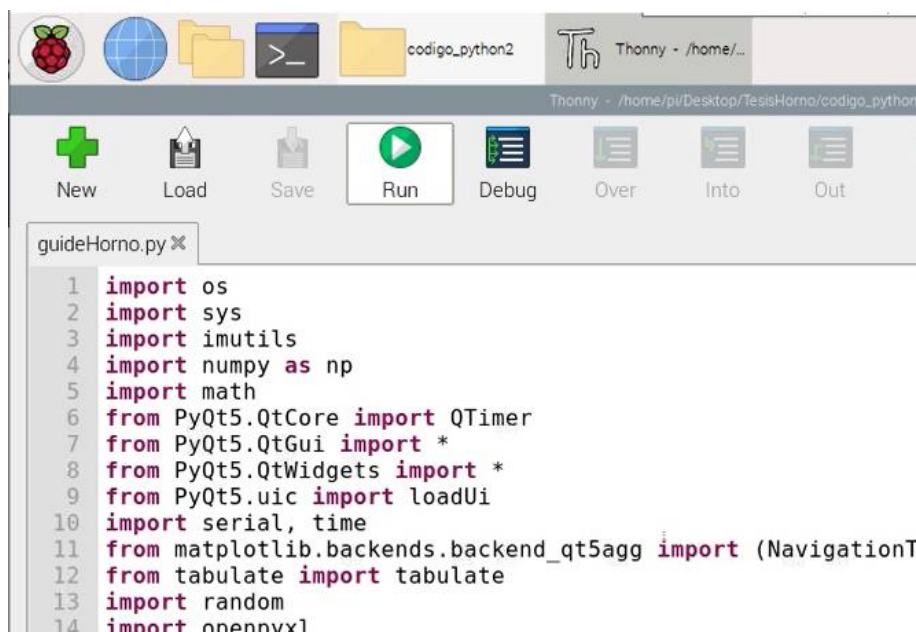


Figura 7-4. Ejecutar programa.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Se abrirá la interfaz del programa donde se puede acceder a la configuración y a la toma de datos.



Figura 8-4. Interfaz del banco didáctico de instrumentación.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Antes de iniciar con la toma de datos, se deben establecer todos los parámetros de funcionamiento en la parte de la configuración, siendo los mismos para la calibración de termopares o para el control del horno, se detallan los pasos para ambos procesos a continuación.

El procedimiento para realizar esta práctica es el mismo para las tres etapas, en temperaturas entre 100 a 400°C. Como ejemplo se efectuará una práctica en la etapa de la termocupla tipo J a una temperatura de 250°C y en los procesos matemáticos se usará el software Matlab, teniendo en cuenta que el método matemático seleccionado que realizará el estudiante queda a criterio del docente.

4.1.2.1. Calibración de termopares.

Como requerimiento inicial de este proceso en la pantalla de configuración, los valores de la sección de la ecuación característica no deben presentar ningún dato que la modifique (Conservar “None”).



Figura 9-4. Requerimientos iniciales para la calibración de termopares.
 Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Se carga la configuración y se ingresa a la pantalla de toma de datos, en esta sección se establece la temperatura en 250°C en la etapa 1 que corresponde a la termocupla J.

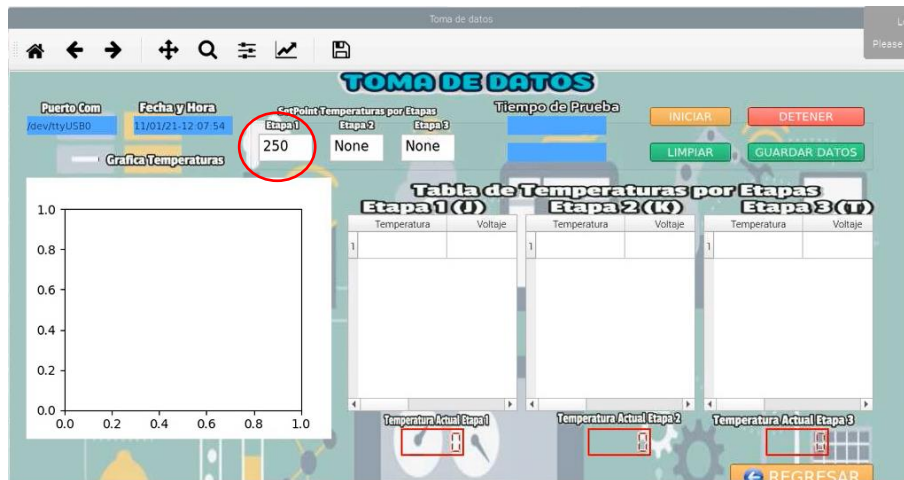


Figura 10-4. Temperatura de trabajo en la etapa 1.
 Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2020.

El presionar el botón “iniciar” accionará el horno y comenzará la toma de datos, estos datos de temperatura y voltaje del termopar patrón se tomarán cada segundo y serán reflejados en una gráfica en la interfaz hasta llegar a la temperatura establecida, toda esta información se guardará en un archivo .xlsx y .jpg respectivamente.



Figura 11-4. Horno encendido al iniciar la práctica.
 Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

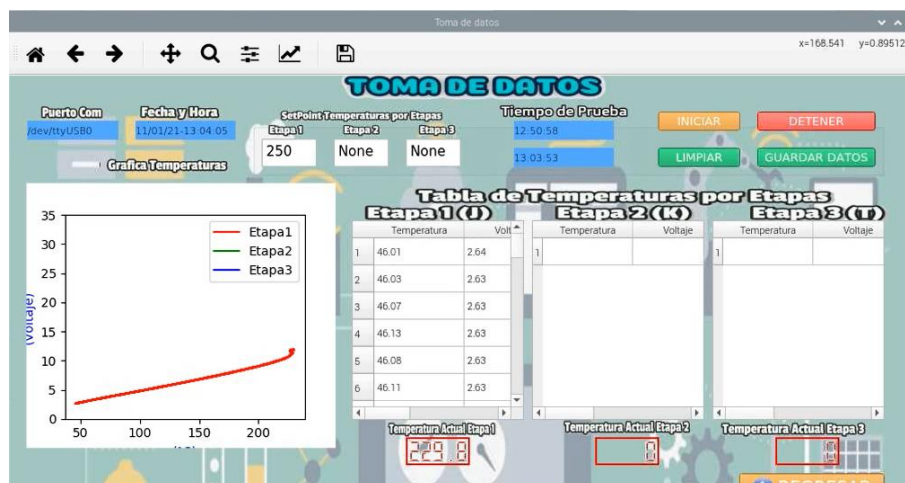


Figura 12-4. Datos y gráfica de la etapa utilizada.
 Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Una vez alcanzada la temperatura establecida se presiona el botón detener, apagando así el horno y permitiendo que este se enfríe para su uso posterior en la práctica.

Una vez detenido el proceso, se presiona el botón guardar datos, lo que genera el archivo de Excel de la etapa y se encontrará en la carpeta código_python2.

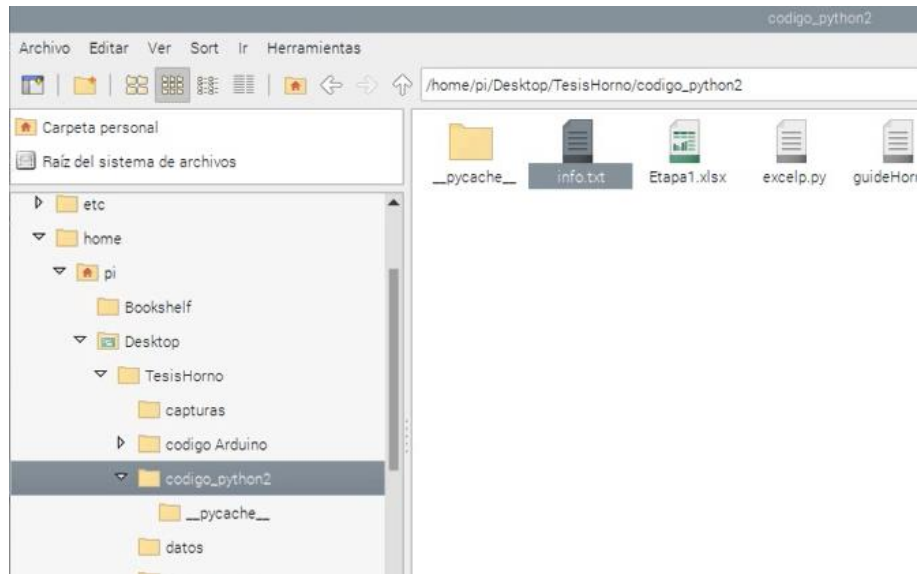


Figura 13-4. Datos guardados correspondientes a la etapa utilizada.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Se exportan los datos de la Raspberry en el dispositivo.

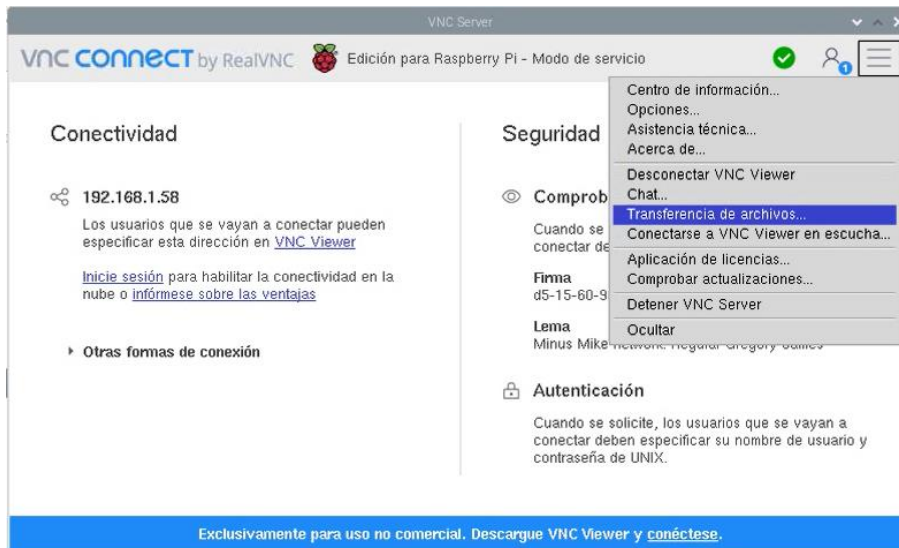


Figura 14-4. Transferencia de archivos desde VNC.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

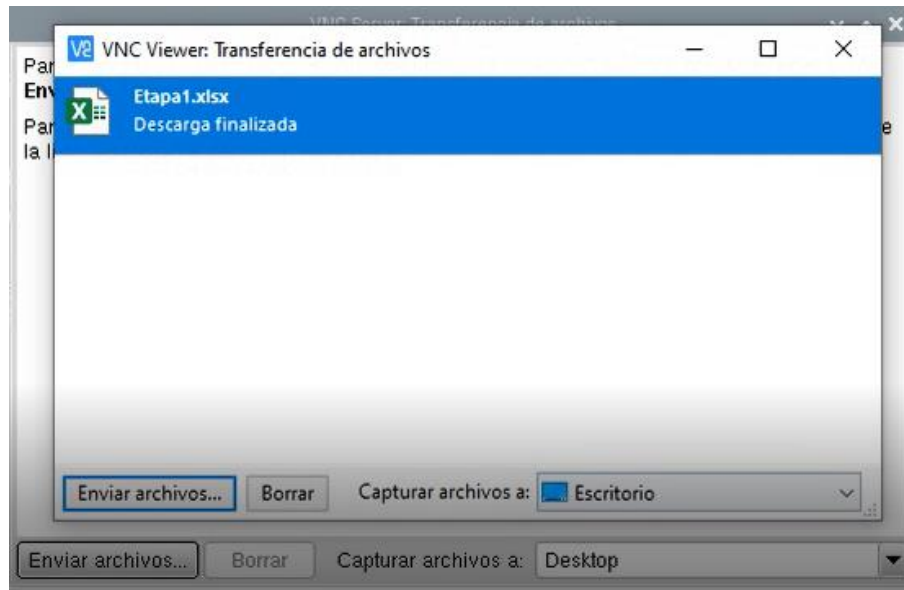


Figura 15-4. Envío de datos obtenidos de la etapa 1.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Como se puede observar los datos de temperatura y voltaje se encuentran detallados en columnas con fecha y hora.

TIEMPO	TEMPERATURA	VOLTAJE
11/01/21-12:51:02	46.01	2.64
11/01/21-12:51:03	46.03	2.63
11/01/21-12:51:04	46.07	2.63
11/01/21-12:51:05	46.13	2.63
11/01/21-12:51:06	46.08	2.63
11/01/21-12:51:07	46.11	2.63
11/01/21-12:51:09	46.13	2.63
11/01/21-12:51:10	46.16	2.63
11/01/21-12:51:11	46.22	2.63
11/01/21-12:51:12	46.27	2.64
11/01/21-12:51:13	46.28	2.65
11/01/21-12:51:14	46.52	2.65
11/01/21-12:51:15	46.61	2.66

Figura 16-4. Datos obtenidos a una temperatura de 250°C en la etapa 1 por 13 min.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Estos datos se utilizaron en el software Matlab para facilitar la caracterización del termopar a prueba.

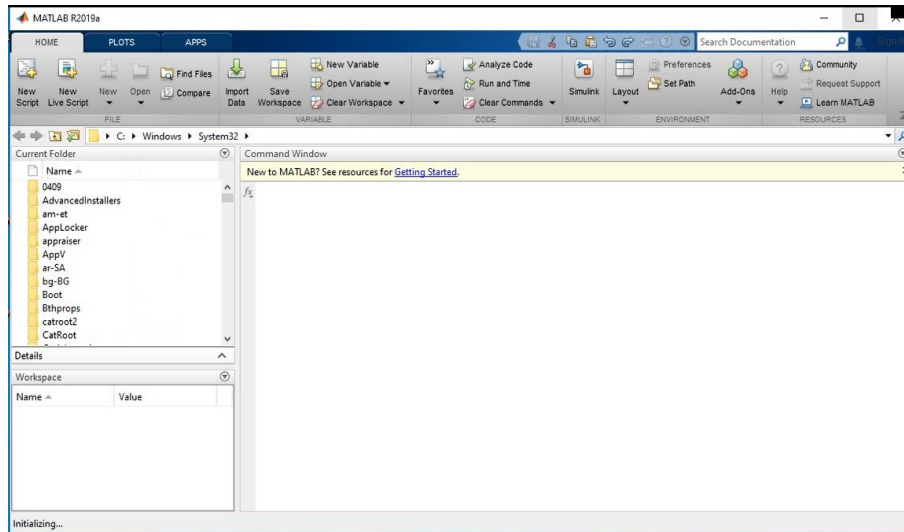


Figura 17-4. Matlab.
 Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Es necesario dirigirse a la opción de import data, buscar el archivo con los datos de la etapa 1 y seleccionarlo como column vectors, luego se extraen los datos numéricos de temperatura y voltaje.

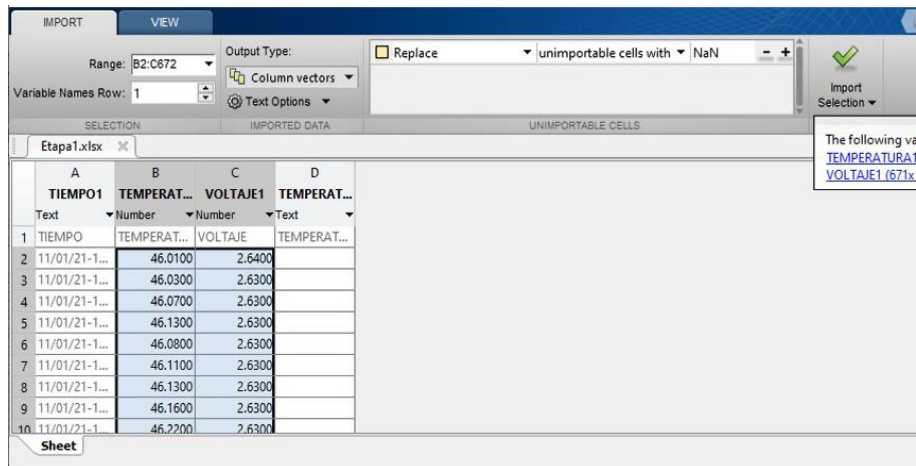


Figura 18-4. Columna de Vectores de los datos de la etapa1.
 Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Al realizar esta acción se observará que los vectores han sido definidos en la parte inferior izquierda.

Details	
Workspace	
Name	Value
TEMPERATURA1	671x1 double
VOLTAJE1	671x1 double

Figura 19-4. Vectores definidos en Matlab.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

En la ventana principal de Matlab se selecciona la pestaña de APPS, y se presiona en la opción de Curve Fitting, esta herramienta es muy útil para parametrizar la curva de temperatura vs voltaje, en los valores de X se selecciona el vector de voltaje mientras que en los valores de Y el de temperatura.

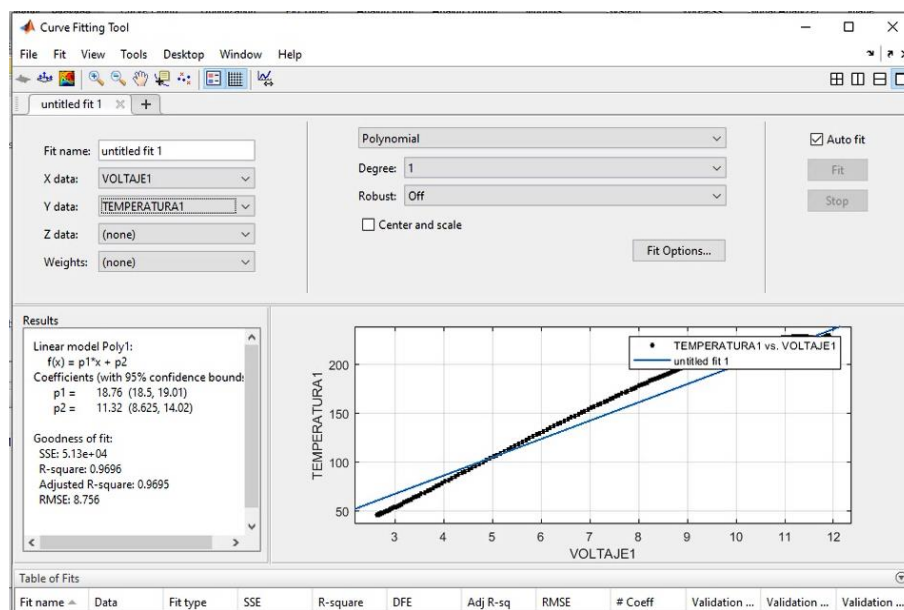


Figura 20-4. Curving Fitting Tool de Matlab.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Se puede apreciar que la curva es una función polinomial, y el grado que más se asemeja a dicha función es una de tercer orden, con la ayuda de esta herramienta se obtienen todos los coeficientes necesarios para caracterizar el termopar a prueba.

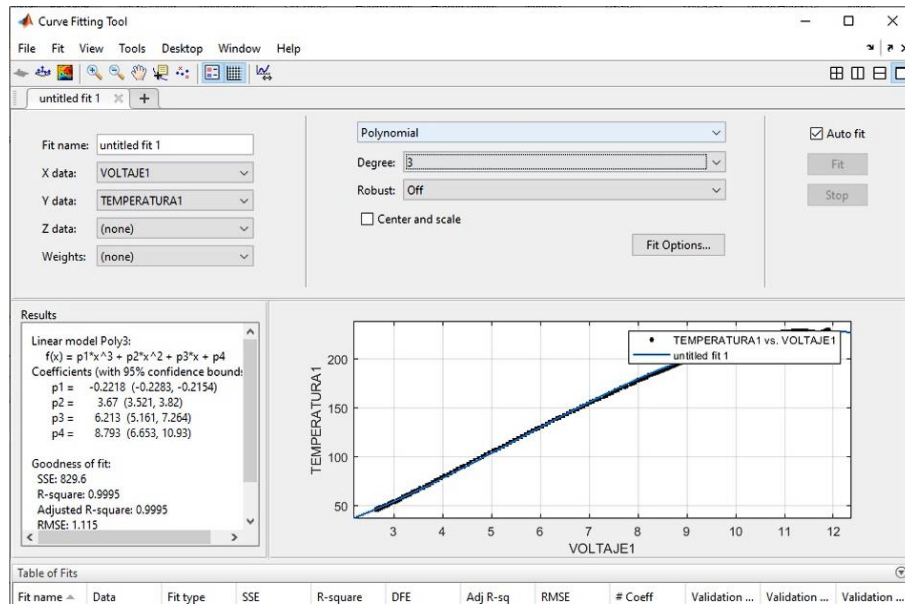


Figura 21-4. Ajuste de la curva para parametrizar la función.
 Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

La ecuación obtenida de la función de tercer grado, se carga en la pantalla de configuración de la interfaz, para caracterizar el termopar de prueba.

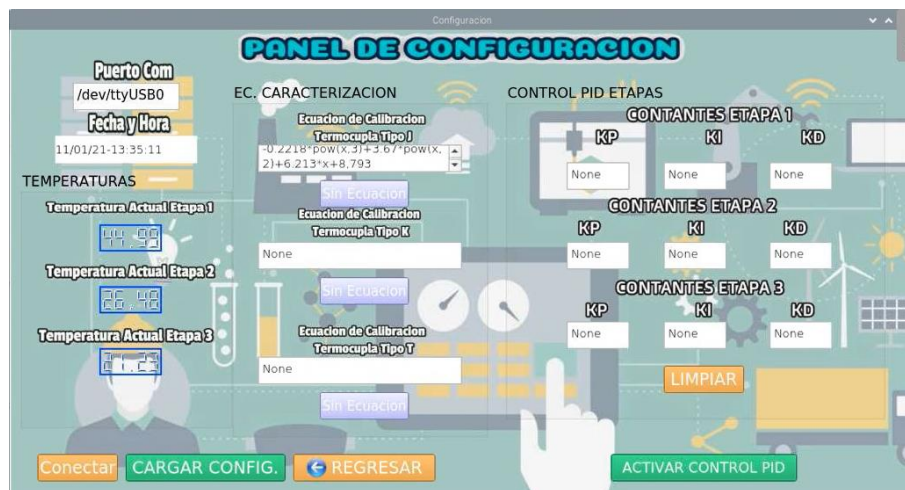


Figura 22-4. Ingreso de la ecuación característica en la etapa 1.
 Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Una vez que el horno se encuentre a una temperatura adecuada para realizar otro ensayo (<50°C), se selecciona el botón cargar configuración para iniciar la toma de datos en la cual se reflejaran los valores de temperatura del termopar patrón y la temperatura calculada con el voltaje medido del termopar bajo prueba.

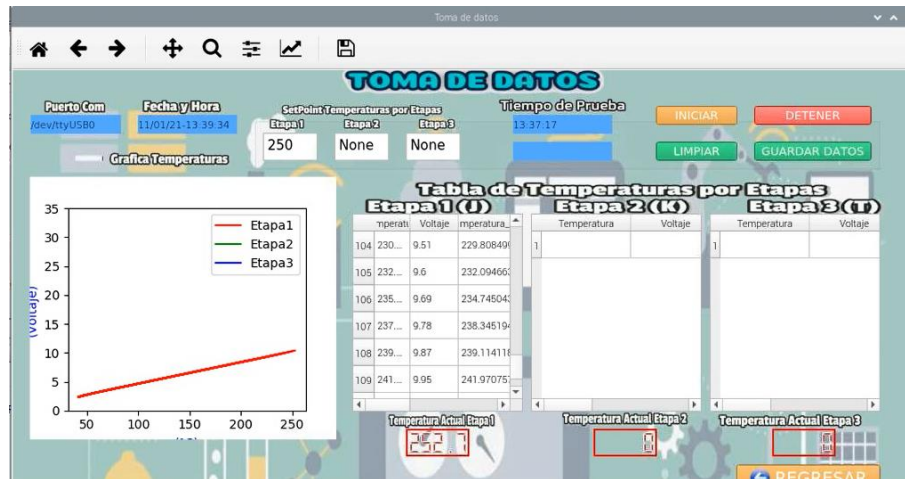


Figura 23-4. Datos y gráfica de la temperatura en la etapa 1.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Una vez más es necesario detener el equipo, seguido se presiona guardar datos y la tabla de valores de la temperatura del termopar patrón con la temperatura calculada del patrón a prueba se generan en un archivo Excel.

TIEMPO	TEMPERATURA	VOLTAJE	TEMPERATURA_CAL
11/01/21-13:	42.2	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.3	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.31	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.28	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.28	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.38	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.4	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.38	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.47	2.39	41.577481365800004
11/01/21-13:	42.51	2.4	41.7772368
11/01/21-13:	42.59	2.4	41.7772368
11/01/21-13:	42.78	2.41	41.977406842200004

Figura 24-4. Temperatura calculada del termopar a prueba con la temperatura del patrón.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Como se observa en la Figura 24-4 las temperaturas son casi las mismas, es decir, la termocupla bajo prueba está calibrada, con error calculado del 0,29%.

4.1.2.2. Control automático de un horno de 3 etapas.

Una vez realizadas las configuraciones preliminares del banco ya mencionadas, se verifica que los parámetros de control no se encuentren con valores que alteren el funcionamiento primario del horno (Conservar “None”), para el presente caso se seleccionó la etapa 1.



Figura 25-4. Requerimientos iniciales para el control del horno.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

En la pantalla de toma de datos se establece la temperatura de trabajo, se estableció 250°C en la primera etapa, Se presiona el botón iniciar para accionar el horno y por ende el calentamiento de la etapa.



Figura 26-4. Encendido del horno.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

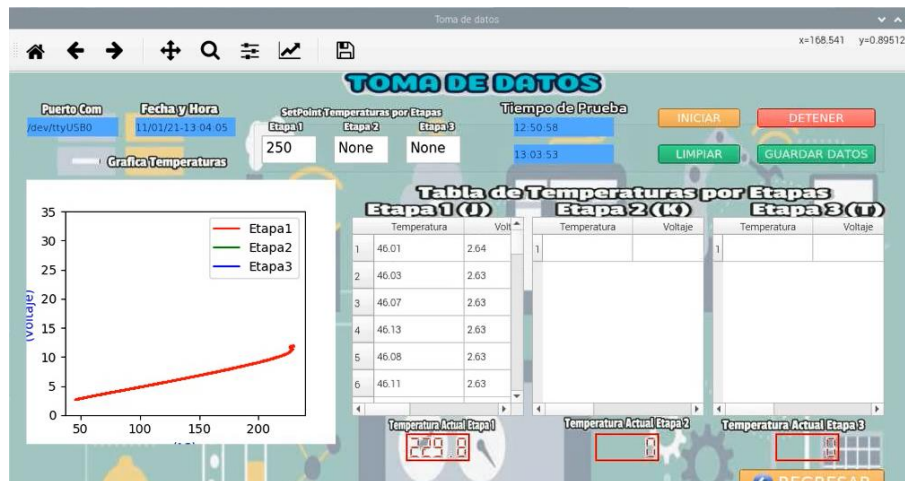


Figura 27-4. Temperatura establecida en la primera etapa.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Quando el horno se estabilice, se presiona el botón detener, lo que guarda los datos, mismos que estarán en un archivo Excel.

TIEMPO	TEMPERATURA
11/01/21-12:51:02	46.01
11/01/21-12:51:03	46.03
11/01/21-12:51:04	46.07
11/01/21-12:51:05	46.13
11/01/21-12:51:06	46.08
11/01/21-12:51:07	46.11
11/01/21-12:51:09	46.13
11/01/21-12:51:10	46.16
11/01/21-12:51:11	46.22
11/01/21-12:51:12	46.27
11/01/21-12:51:13	46.28
11/01/21-12:51:14	46.52
11/01/21-12:51:15	46.61

Figura 28-4. Tabla de valores de Temperatura y tiempo.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Para facilitar la gráfica característica del sistema se hará uso del software Matlab, en la cual se grafica Temperatura vs tiempo en relación con el valor del set point de temperatura que es 250°C.

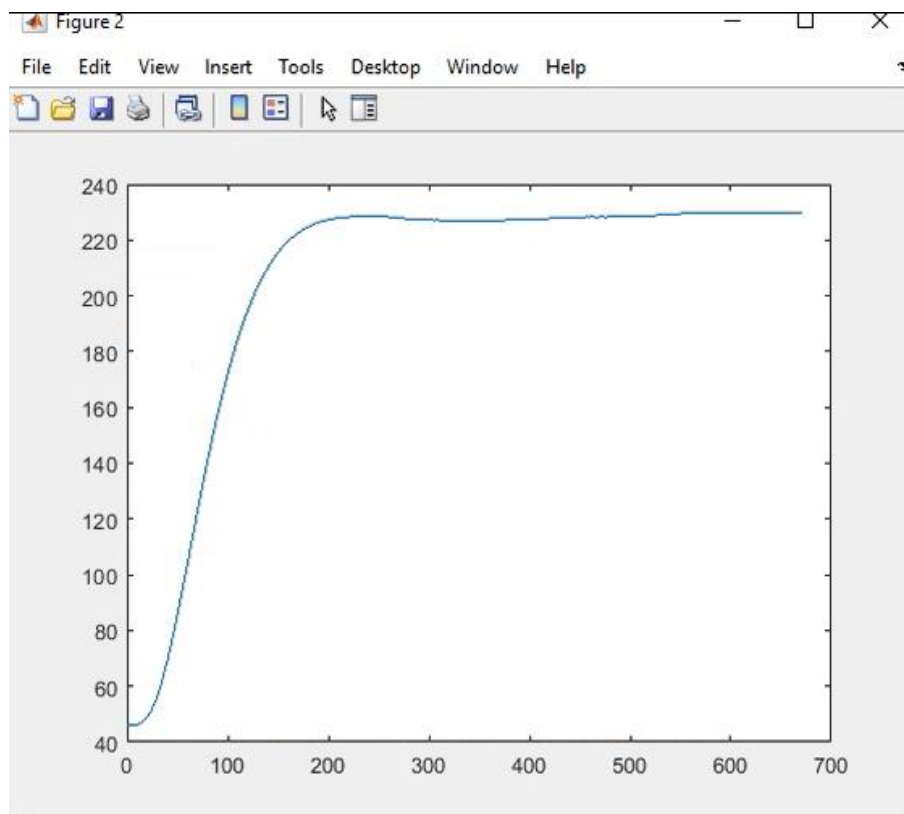


Figura 29-4. Gráfica de Temperatura vs tiempo con set point 250.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

A partir de estos datos se debe encontrar la función de transferencia correspondiente a la planta, lo cual se realiza con el comando `ident` de Matlab, estableciendo los datos de entrada del set point y de salida a la temperatura.

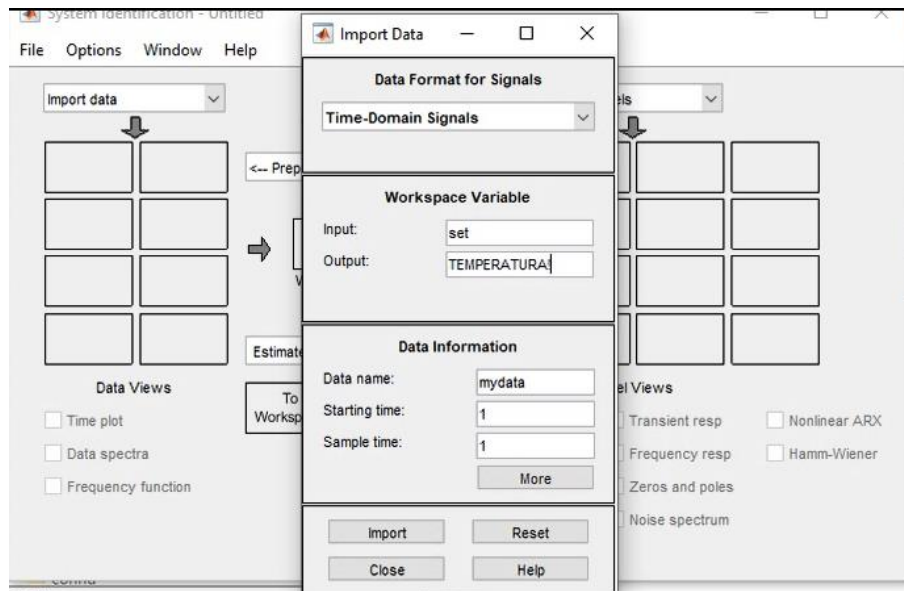


Figura 30-4. Parámetros para el cálculo de la función de transferencia.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

La grafica obtenida inicialmente al parametrizarse se asemeja a un sistema de segundo orden, y al confirmar lo antes mencionado mediante la literatura de control de hornos eléctricos, que con cálculos matemáticos confirman que este tipo de sistema efectivamente pertenecen a uno de segundo orden, se traduciría en el momento de crear la planta en Matlab como un sistema de dos polos y un cero.

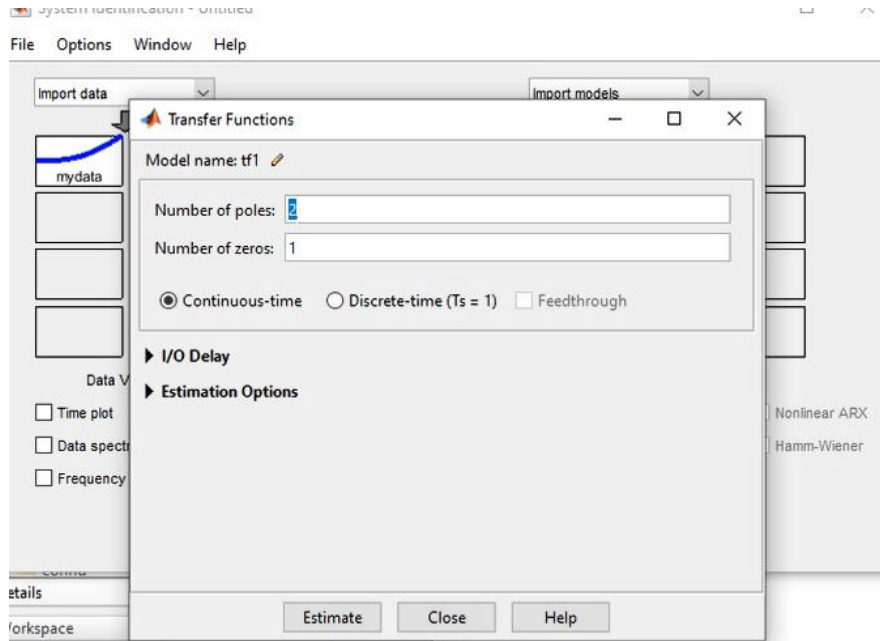


Figura 31-4. Creación de la planta con 2 polos y 1 cero.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

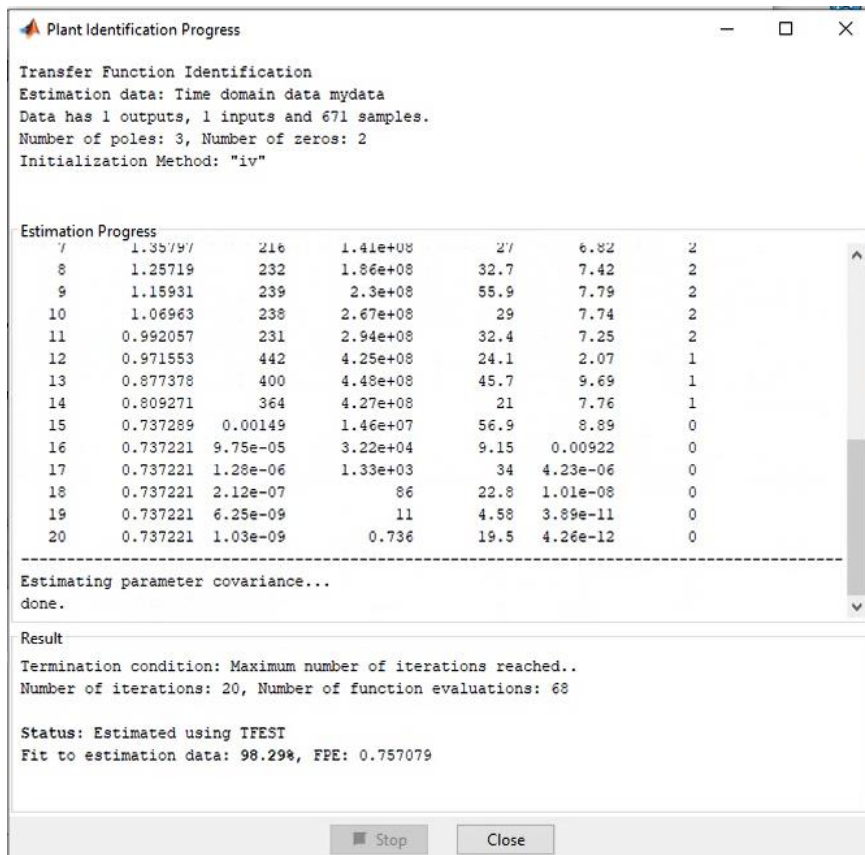


Figura 32-4. Cálculos de Matlab para la ecuación de la planta.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Con esta función de transferencia se tiene la siguiente gráfica que representa la planta.

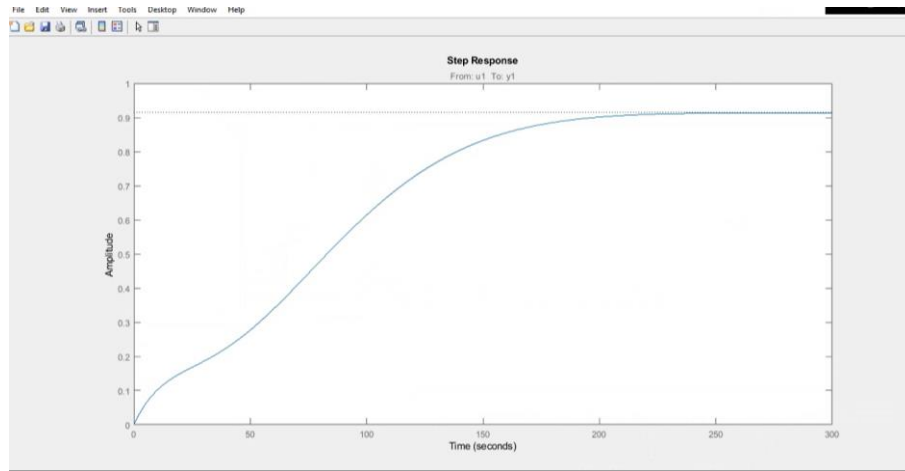


Figura 33-4. Gráfica de la función de transferencia del sistema.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Y Matlab con su herramienta PID Tuner proporcionara los valores de las constantes K_p , K_i y K_d .

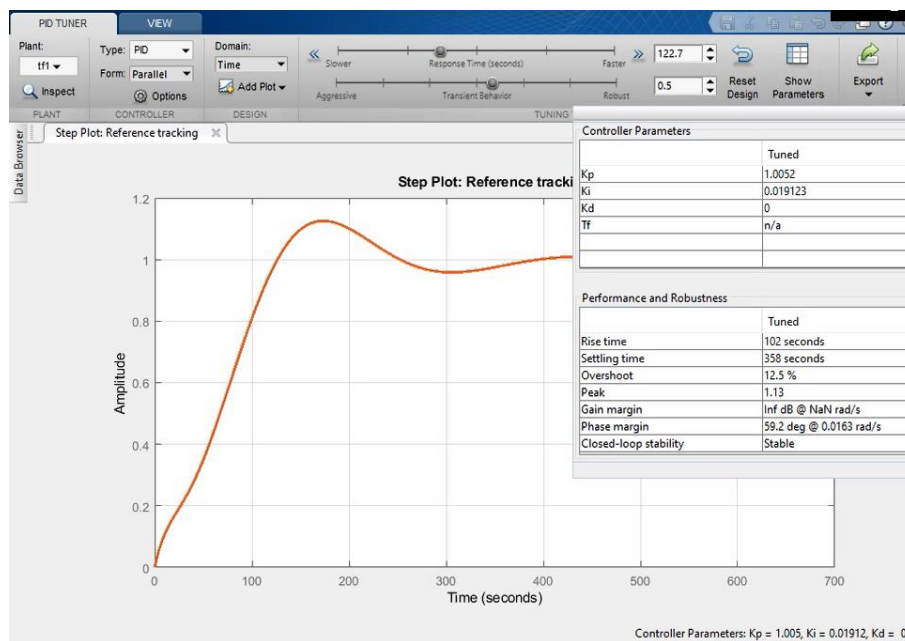


Figura 34-4. Parámetros K_p , K_i y K_d obtenidos por Matlab.

Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Estos valores se ingresan en los parámetros de control de la interfaz, y se carga esta configuración para el arranque del horno con control PID.

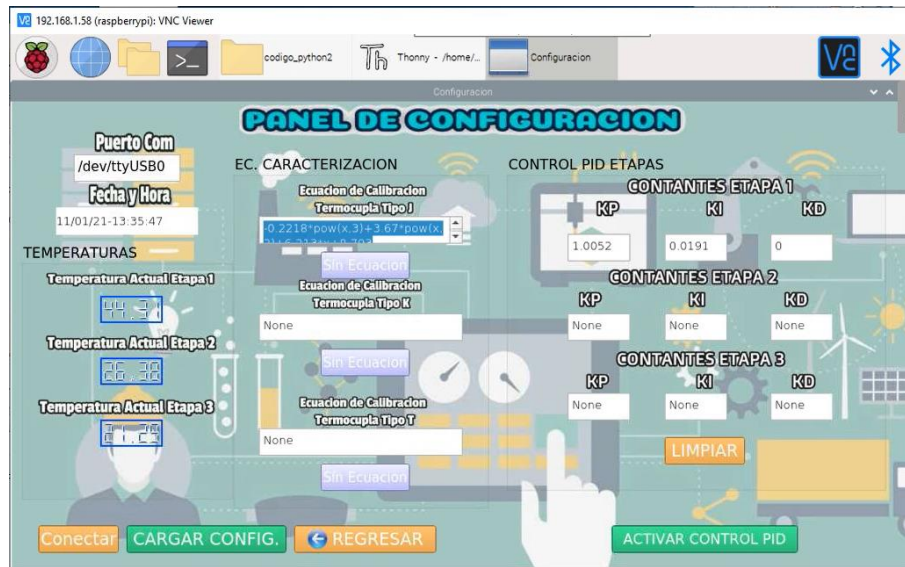


Figura 35-4. Ingreso de parámetros para el control del horno.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

Por último, se inicia la toma de datos, para encender el horno y verificar si el PID estabiliza el sistema, en la gráfica Temperatura vs tiempo, se puede analizar los resultados.

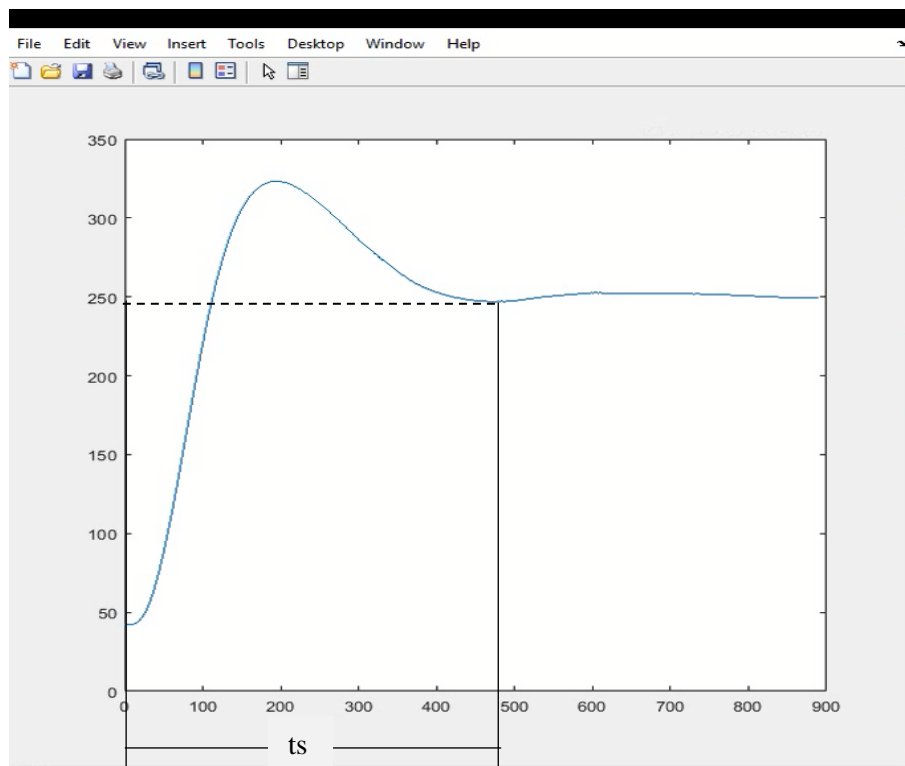


Figura 36-4. Gráfica Temperatura vs tiempo en el sistema controlado por PID.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

El tiempo de estabilización asumiendo un margen de error aceptado del 2% es de 480s, y una sobre oscilación M_p de aproximadamente 80°C. Dando como resultado visible según los tiempos obtenidos que el sistema ha tenido un control automático satisfactorio.

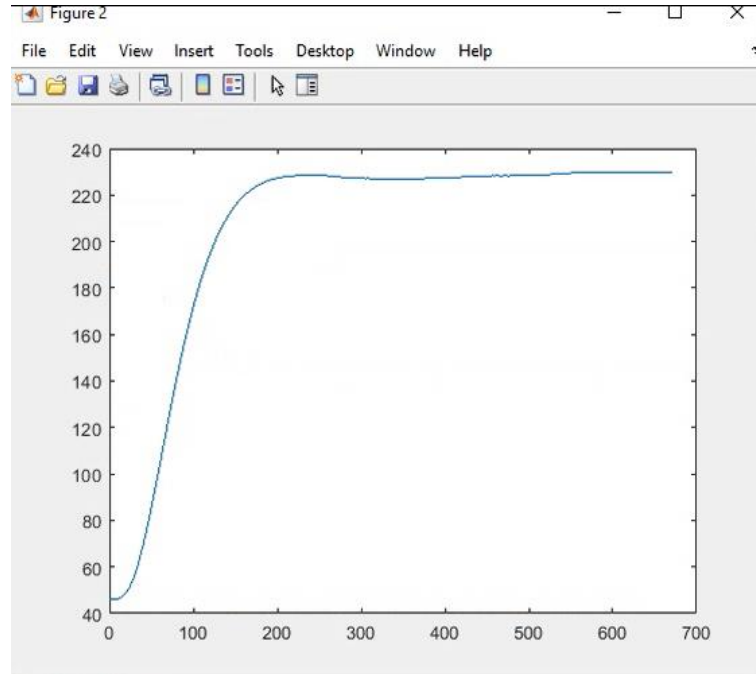


Figura 37-4. Sistema sin ningún tipo de control.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

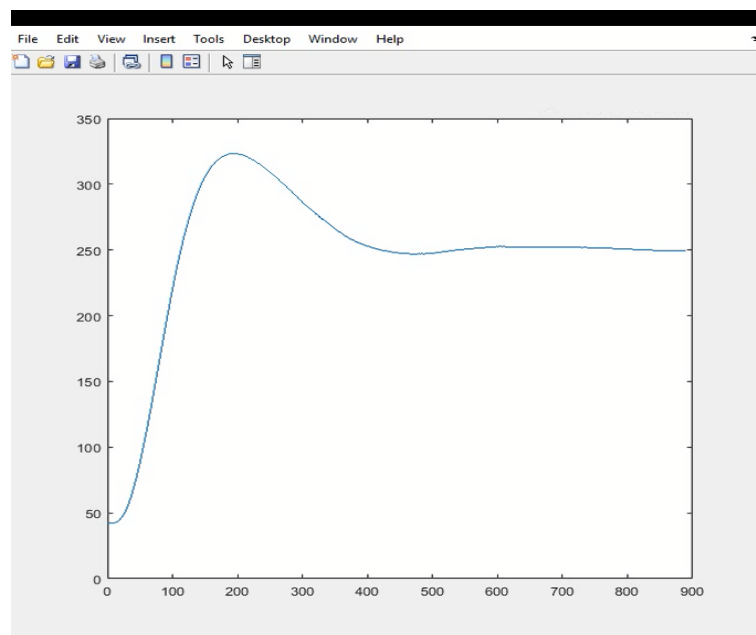


Figura 38-4. Sistema con control PID.
Realizado por: Guerrero, G., Arias, P., 2021.

4.2. Guías de Ensayo

4.2.1. Guía de ensayo de calibración de termocuplas.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

VICERRECTORADO ACADÉMICO

DIRECCIÓN DE DESARROLLO ACADÉMICO



FACULTAD: MECÁNICA

CARRERA: ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

GUÍA DE LABORATORIO

PRÁCTICA ENSAYO DE CALIBRACIÓN DE TERMOCUPLAS J, K & T

1. DATOS GENERALES:

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

- ✓ Determinar mediante la experimentación, que una determinada termocupla (J, K o T) al tomar valores en un horno y al comparar dichos valores con los tomados por su respectiva termocupla patrón, se encuentra, o no, calibrada, es decir se calculara el porcentaje de error existente entre las lecturas de las termocuplas Patrón y de Trabajo.

2.2 ESPECÍFICOS.

- ✓ Obtener los valores de lectura de voltaje de las termocuplas y la relación de temperatura correspondiente a dichas lecturas
- ✓ Determinar e interpretar la curva Voltaje Vs. Temperatura de cada termocupla.
- ✓ Obtener el modelo matemático que rige al sensor patrón analizado
- ✓ Determinar e interpretar el porcentaje de error entre la termocupla patrón y la de trabajo

3. INSTRUCCIONES

1. Ingresar al Laboratorio haciendo uso del equipo de protección personal (EPP): casco, mandil y calzado adecuado.
2. Verificar que el banco no esté encendido y que alrededor del módulo del horno no existe ningún objeto que represente riesgos.
3. Encender la maquina con monitor y mouse conectado; de querer realizar la práctica de manera inalámbrica solo encender la máquina.
 - 3.1. Si se opta por hacer la práctica de manera inalámbrica (laptop, celular, etc.) es necesario conocer la IP del equipo (Raspberry), esto se puede hacer mediante cualquier software de escaneo de redes
 - 3.2. Una vez obtenida la dirección IP del banco, esta debe ser ingresada en el software VNC Viewer (Usuario: Pi, Contraseña:1234), programa en el cual se visualizará el Sistema operativo del banco, siendo esta exactamente la misma mostrada al usar monitor y teclado.
4. Ejecutar la interfaz gráfica del banco ubicada en la dirección Tesis_horno/código_python2/guideHorno.py/RUN
5. En el panel de configuración se verifica que todos los parámetros estén vacíos (NONE), y se retorna a la página principal.
6. En el menú Toma de datos se establece la temperatura en la etapa que se va a utilizar y se presiona el botón Start, lo que accionara el horno e iniciara la toma de datos
7. Una vez alcanzada la temperatura deseada, se detiene el proceso y se guardan los datos, se generará un documento Excel en la carpeta: código_python2
8. Los datos obtenidos pueden ser exportados al pc o a un pen-drive, y con dichos datos se procede a caracterizar el termopar a prueba, mientras se deja enfriar el horno
9. Con la ecuación característica de la termocupla y con la temperatura del horno adecuada (menor a 50°) se introduce en el menú panel de configuración la ecuación característica y se carga configuración.
10. Se activa otra vez el funcionamiento del banco y se observan los datos de voltaje y temperatura de las termocuplas Patrón y de Trabajo, estos datos también se pueden exportar.
11. Se detiene el proceso del banco cerrando y apagando correctamente el equipo.

4. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR:

4.1. EQUIPOS



Fig 1. Banco de Calibración de termocuplas y control del horno

Partes:

1.
2.
3.
4.
5.

4.2. ACCESORIOS



Fig 2. computador

5. MARCO TEÓRICO

Termocuplas

Funcionamiento, Ley que las rige, Tipos de termocupla, Rangos y Aplicaciones.

Variables:

Unidades:

NORMA

En este ensayo se utilizará La Norma ASTM E230 “Tablas de especificación estándar y Temperatura - Fuerza Electromotriz (EMF) para termopares estandarizados” la cual indica los estándares de termocuplas y relaciona la temperatura correspondiente a la cantidad de mV.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Obtención de datos

Tabla 1. Datos Previos al ensayo

Tipo de termocupla	
Temperatura Seleccionada (°C)	

Tabla 2. Valores de Voltaje temperatura de la termocupla Patrón

Datos	Tiempo (s)	Voltaje (mV)	Temperatura (°C)
1			
2			
3			
4			
5			
.....			

n			
-----	--	--	--

Obtención de la ecuación característica de la termocupla

Tabla 3. Ec Caracteristica

Ec. Caracteristica	
--------------------	--

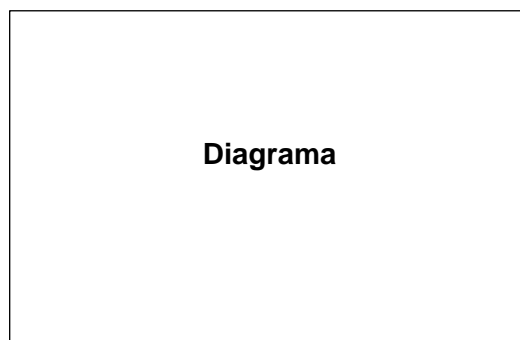


Fig. 1. Diagrama (Temperatura vs Voltaje) de la caracterización

Comparación de termocupla Patrón y de Trabajo:

Tabla 4. Datos de las termocuplas Patrón y de Trabajo.

Datos	Tiempo (s)	Voltaje Termocupla Patrón (mV)	Temperatura Termocupla Patrón (°C)	Voltaje Termocupla Analizada (mV)	Temperatura Termocupla Analizada (°C)
1					
2					
3					
4					
5					
.....					
n					

Cálculo del Porcentaje de Error:

Mediante cálculos se obtiene el porcentaje de error existente entre las termocuplas Patrón y de trabajo analizando así, si esta última se encuentra o no Calibrada

7. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

Mediante este ensayo se analizará el funcionamiento y caracterización de los distintos tipos de termopares, Además de discutir con los resultados obtenidos y según la norma ASTM E230 si las temperaturas son los correspondientes a los voltajes presentados, concluyendo así con el análisis de si la termocupa de trabajo se encuentra o no calibrada.

8. CONCLUSIONES

Las conclusiones se atribuyen a las ideas y conocimiento del estudiante adquiridos a través del desarrollo de esta práctica. Dando respuesta a el cuestionamiento previo planteado.

9. RECOMENDACIONES

Aquí se recoge ideas por parte del estudiante donde se busca retroalimentar la información, desarrollo o precisión de esta práctica.

10. BIBLIOGRAFÍA

Citar bibliografía según la Norma

4.2.2. Guía de ensayo de control PID del horno



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

VICERRECTORADO ACADÉMICO

DIRECCIÓN DE DESARROLLO ACADÉMICO



FACULTAD: MECÁNICA

CARRERA: ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

GUÍA DE LABORATORIO

PRÁCTICA ENSAYO DE CONTROL PID DE UN HORNO ELÉCTRICO

1. DATOS GENERALES:

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

- ✓ Determinar y aplicar los parámetros K_p , K_i y K_d en el banco de pruebas para obtener un control PID óptimo del horno.

2.2 ESPECÍFICOS.

- ✓ Analizar el funcionamiento del horno y como éste maneja las temperaturas a través del tiempo
- ✓ Obtener la función de Transferencia correspondiente al proceso del horno
- ✓ Calcular los parámetros K_p , K_i y K_d correspondientes a la Planta.
- ✓ Realizar las gráficas correspondientes a la respuesta del sistema sin control y luego el sistema con el control PID
- ✓ Analizar el impacto que tiene el control PID en el sistema, así como sus pros y contras.

3. INSTRUCCIONES

1. Ingresar al Laboratorio haciendo uso del equipo de protección personal (EPP): casco, mandil y calzado adecuado.
2. Verificar que el banco no esté encendido y que alrededor del módulo del horno no existe ningún objeto que represente riesgos.
3. Encender la maquina con monitor y mouse conectado; de querer realizar la práctica de manera inalámbrica solo encender la máquina.
 - a. Si se opta por hacer la práctica da manera inalámbrica (laptop, celular, etc.) es necesario conocer la IP del equipo (Raspberry), esto se puede hacer mediante cualquier software de escaneo de redes
 - b. Una vez obtenida la dirección IP del banco, esta debe ser ingresada en el software VNC Viewer (Usuario: Pi, Contraseña:1234), programa en el cual se visualizará el Sistema operativo del banco, siendo esta exactamente la misma mostrada al usar monitor y teclado.
4. Ejecutar la interfaz gráfica del banco ubicada en la dirección Tesis_horno/código_python2/guideHorno.py/RUN
5. En el panel de configuración se verifica que todos los parámetros estén vacíos (NONE),y se regresa a la página principal.
6. En el menú Toma de datos se establece la temperatura en la etapa que se va a utilizar y se presiona el botón Start, lo que accionara el horno e iniciara la toma de datos.
7. Alcanzada la temperatura deseada, Se detiene el proceso y se guardan los datos, se generará un documento Excel en la carpeta: código_python2(Los datos obtenidos pueden ser exportados al pc o a un pen-drive)
8. Con los datos obtenidos se realiza la gráfica (Temperatura - tiempo) y se obtiene la función de transferencia de la planta
9. Calcular los parámetros Kp Ki y Kd adecuados para el sistema, mientras el horno se enfría hasta una temperatura adecuada (menor a 50°).
10. se configura el menú panel de configuración con los parámetros de control obtenidos (cargar configuración)
11. Se activa nuevamente el funcionamiento del banco obteniendo una nueva tabla de valores
12. Se detiene el proceso del banco cerrando y apagando correctamente el equipo.

4. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR:

4.1. EQUIPOS



Fig 1. Banco de Calibración de termocuplas y control del horno

Partes:

1.
2.
3.
4.
5.

4.2. ACCESORIOS



Fig 2. computador

5. MARCO TEÓRICO

Horno Eléctrico

Funcionamiento, Tipo de Sistema al que pertenece (número de polos y ceros en la planta)

Control PID

Generalidades de este tipo de control, métodos para calcular los parámetros K_p , K_i , y K_d .

Respuesta de un sistema sub-amortiguado a una entrada escalón unitario y los parámetros que la componen

Variables:

Unidades:

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Obtención de datos

Tabla 1. Datos Previos al ensayo

Etapa del Horno Seleccionada	
Temperatura Seleccionada (°C)	

Tabla 2. Valores de temperatura del sistema sin aplicar control

Datos	Tiempo (s)	Temperatura (°C)
1		
2		
3		
4		
5		
.....		
n		

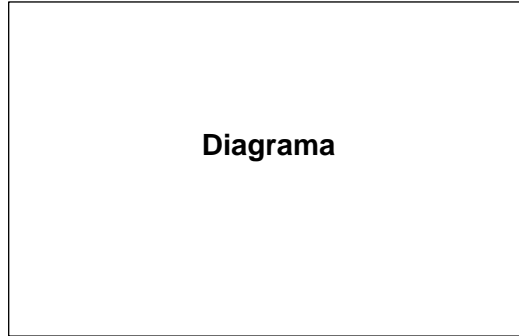


Fig. 3. *Diagrama (Temperatura vs tiempo) del sistema*

Cálculo de la función de transferencia y obtención de la planta

Tabla 3. Ec Caracteristica

Función de transferencia	
--------------------------	--

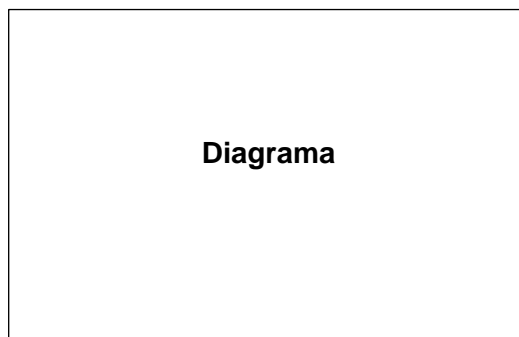


Fig. 4. *Diagrama de la planta correspondiente al sistema*

Cálculo de los parámetros de control

Tabla 4. Datos de las termocuplas Patrón y de Trabajo

Parámetros de control	
K_p	
K_i	
K_d	

Control PID del horno

Tabla 5. Valores de temperatura del sistema con control PID

Datos	Tiempo (s)	Temperatura (°C)
1		
2		
3		
4		
5		
.....		
n		

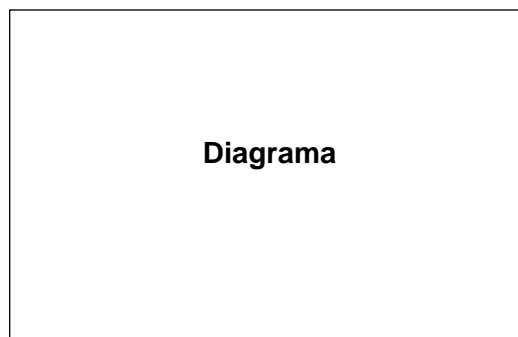


Fig. 5. Diagrama (Temperatura vs tiempo) del sistema controlado

Parámetros del sistema sub-amortiguado ante una entrada escalón unitario.

Analizar la respuesta del sistema después del control PID y calcular los parámetros:

Tiempo de establecimiento, T_s

Tiempo de pico, t_p .

Sobre-oscilación, M_p

Tiempo de subida, t_r

Analizar gráficamente los parámetros de la repuesta del sistema

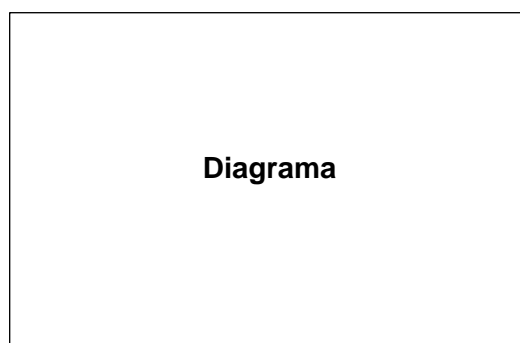


Fig. 6. Parámetros del sistema como respuesta del control PID

7. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

Mediante este ensayo se analizará el funcionamiento del sistema de control PID mientras se visualizará el efecto del mismo en un sistema térmico, además se analizarán los parámetros obtenidos como resultado de aplicar el control, y se discutirá el cómo se podrían mejorar dichos parámetros.

8. CONCLUSIONES

Las conclusiones se atribuyen a las ideas y conocimiento del estudiante adquiridos a través del desarrollo de esta práctica. Dando respuesta a el cuestionamiento previo planteado.

9. RECOMENDACIONES

Aquí se recoge ideas por parte del estudiante donde se busca retroalimentar la información, desarrollo o precisión de esta práctica.

10. BIBLIOGRAFÍA

Citar bibliografía necesaria para entender y realizar la presente practica

CONCLUSIONES

- El uso de herramientas didácticas como el diagrama de la casa de la calidad y la valoración de las alternativas de solución, acompañadas de un software especializado en el diseño como lo es SolidWorks, permitió determinar la mejor opción de diseño y construcción del banco didáctico de instrumentación.
- Se analizó el funcionamiento de los termopares J, K & T, como la ley que los rige (efecto Seebeck), gracias a ello se consiguió parametrizar la ecuación de cada dispositivo, ya que dicho efecto manifiesta que a cada valor de voltaje medido le corresponde un valor de temperatura.
- Se especificó las características de todos los elementos eléctricos, mecánicos y electrónicos empleados en la elaboración del banco didáctico, mediante un análisis de relación calidad-precio, obteniendo en sí las mejores soluciones.
- Se implementó un horno eléctrico de acero inoxidable AISI 304, con tres cámaras cilíndricas calentadas por medio de resistencias de cuarzo, como medio de análisis, para la toma de datos del termopar patrón y su posterior comparación con el termopar a prueba.
- Se obtuvo los valores necesarios para encontrar la ecuación de la planta con los cuales se controlan la temperatura en el equipo.
- Para el control del banco se utilizó un microcontrolador Raspberry Pi B+, asistido con un Arduino nano para la toma de datos. El equipo permite modificar las variables P, I, D de manera independientemente consiguiendo setear el control PID de la manera más óptima posible.

RECOMENDACIONES

- Debido a que el banco está pensado como un recurso didáctico los valores de comparación obtenidos son aproximados más no exactos, para obtener valores precisos se recomienda que los termopares usados como patrón estén previamente certificados.
- En caso de querer llevar el equipo a niveles más precisos, se recomienda la modificación del horno eléctrico por un bloque de estado sólido o de baño líquido, debido a que estos tienen un mejor control de temperatura.
- Se recomienda no manipular la programación de los microcontroladores, ya que cualquier modificación podría alterar la fiabilidad de la práctica.
- Se recomienda al estudiante se le provea las instrucciones de uso del equipo, para evitar errores en el funcionamiento y las posteriores prácticas de laboratorio.
- Se recomienda el mantenimiento preventivo del equipo, así como se propuso en el manual para asegurar una vida útil prolongada.

GLOSARIO

Aislante: son materiales con propiedades que tienden a oponerse a la transferencia del calor ya sea por convección, conducción y radiación. (Cano, 2017, pp.30-34)

ASTM: ASTM International es uno de los editores técnicos de normas, documentos técnicos e información relacionada más respetados del mundo. Aplicados a casi todo, desde el petróleo y el acero hasta el cemento y la sostenibilidad, las normas ASTM ayudan a las empresas a mejorar la calidad y la competitividad, al tiempo que mejoran las vidas de millones de personas en todo el mundo todos los días. (ASTM International, 2021)

Automatización: es el conjunto de elementos o procesos informáticos, mecánicos y electromecánicos que operan con mínima o nula intervención del ser humano, estos generalmente se utilizan para optimizar y mejorar el funcionamiento de una planta industrial. (Logicbus, 2021)

Calibración: es la comparación documentada entre el dispositivo de medición que se va a calibrar y un dispositivo de referencia trazable. (Beamex, 2021)

Calor: el calor es la energía intercambiada entre un cuerpo y su entorno por el hecho de encontrarse a distinta temperatura. El calor, como el trabajo, es energía en tránsito, por lo que se puede entender como un método para transferir energía. (Fiscalab, 2021)

Conductor eléctrico: es aquel material que ofrece una baja resistencia al movimiento de una carga eléctrica. La causa cabe encontrarla en sus átomos, caracterizados por la presencia de escasos electrones, lo cual permite que la energía se esparza rápidamente de un átomo a otro. (Gemsa, 2021)

Control automático: el control automático compara el valor efectivo de la salida de una planta con el valor deseado, determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. (Ecured, 2021)

Corriente: es la velocidad a la que un flujo de electrones pasa por un punto de un ciclo eléctrico completo. Un amperio es la unidad para la medición de la corriente. Expresa la cantidad de electrones que pasan por un punto en un circuito durante un tiempo determinado. (Fluke, 2021)

Horno: es un dispositivo que produce calor y lo mantiene dentro de una cámara cerrada, se usa principalmente para la preparación de alimentos y en el sector industrial para la fundición y calentamiento de materiales, la energía necesaria para alimentar un horno puede ser directa mediante el uso de combustibles o indirecta por medio del empleo de la electricidad. (Robalino y Sánchez, 2016, pp.23-24)

Industria: es el conjunto de las operaciones que se desarrollan para obtener, transformar o transportar productos naturales. El término también se utiliza para nombrar a la instalación que se destina a este tipo de operaciones y al conjunto de las industrias de un mismo género o de una misma región por ejemplo la industria textil. (Ecured, 2021)

Magnitudes Termométricas: unidades o cantidades que varían con la temperatura. La expansión lineal de un líquido o la resistencia eléctrica de un metal pueden ser un claro ejemplo de estas unidades termométricas. (Lab-Volt, 2005 pp.23-28)

Microcontrolador: Es un circuito integrado que en su interior posee una CPU con unidades de memoria RAM y ROM (Marques, 2011, p.5)

Patrón: instrumentos de referencia, ya que muestran el valor “real” de una magnitud específica. (Calderón, 2018, p.26)

Temperatura: las partículas de los cuerpos no están en reposo, sino que se encuentran en constante agitación. Como consecuencia de esta agitación, los cuerpos poseen una determinada energía térmica. La temperatura es un indicador de energía térmica que tienen los cuerpos. De modo general podemos decir que, a mayor temperatura, mayor energía de este tipo. (Fiscalab, 2021)

Termopar: es un sensor para medir la temperatura. Se compone de dos metales diferentes, unidos en un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o se enfría, se produce una tensión que es proporcional a la temperatura. Las aleaciones de termopar están comúnmente disponibles como alambre. (Omega, 2021)

Voltaje: denominado también como tensión o diferencia de potencial, es una magnitud física que impulsa a los electrones a lo largo de un conductor en un circuito eléctrico cerrado, provocando el flujo de una corriente eléctrica. (Ecured, 2021)

BIBLIOGRAFÍA

ACONSTRUCTORAS. *Aislante térmico*. [En línea]. 2020. [Consulta: 12 Febrero 2021]. Disponible en: <https://www.aconstructoras.com/index.php?sig=20>

ADAFRUIT INDUSTRIES. *Amplificador de termopar universal Adafruit MAX31856*. [En línea]. 2020. [Consulta: 12 Febrero 2021]. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-max31856-thermocouple-amplifier>.

ALCÁZAR, Yulieth; et al. *Formulación de los requerimientos y expectativas de un cliente para el boceto de un producto por medio de la herramienta Quality Function Deployment (QFD)*. [En línea]. Cartagena : Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, 2017. [Consulta: 8 Diciembre 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331745559_Formulacion_de_los_requerimientos_y_expectativas_de_un_cliente_para_el_boceto_de_un_producto_por_medio_de_la_herramienta_Quality_Function_Deployment_QFD

ALLIED. [En línea]. 2020. [Consulta: 16 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://us-es.alliedelec.com/product/fluke/9150-a-156/70301400/>.

ALZATE, Edwin; et al. “Medición de Temperatura: Sensores Termoeléctricos”. *Scientia et Technica*, [En línea], (2007), (Colombia), pp. 1–3. [Consulta: 23 Abril 2019]. ISSN 0122-1701. Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5509/3181>

ARDUINO. *Arduino Nano*. [En línea] 2020. [Consulta: 16 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>.

AVILÉZ, Gonzalo. *Análisis del Proceso de Calibración de Termohigrómetros y su Incidencia en la Productividad de la Empresa Tecniprecisión cía. Ltda.* [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería). Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito-Ecuador, 2016. pp. 9-20. [Consulta: 28 Abril 2020]. Disponible en: <http://repositorio.uti.edu.ec/bitstream/123456789/570/1/TESIS%20AVIL%c3%89S%20CAIZA%20GONZALO%20FERNANDO.pdf>

ASTM International. ASTM. [En línea] 2021. [Consulta: 17 Febrero 2021]. Disponible en: <https://la.astm.org>

BEAMEX. ¿Qué es la calibración? [En línea] 2021. [Consulta: 17 Febrero 2021]. Disponible en: <https://www.beamex.com/es/recursos/que-es-la-calibracion/>

BENITES, Rony. Propuesta de Implementación de un Sistema de Control Automático para el Proceso de Secado de Pastas en la Empresa Agroindustria y Comercio s.a. Para mejorar la Productividad. [En línea]. (Trabajo de Titulación), (Ingeniería). Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo-Perú, 2018. pp. 3-20. [Consulta: 17 Agosto 2020]. Disponible en:

http://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/1542/1/TL_BenitesCasta%c3%bl1edaRony.pdf

BERBECHO, Juan; & SARMIENTO, Andrés. Diseño e Implementación de tres bancos didácticos de instrumentación industrial para la medición de fuerza - desplazamiento y temperatura en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador, 2013. pp. 1. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4330/1/UPS-CT002623.pdf>

CALDERÓN, Dora. *Patrones y Sistemas de Unidades.* [En línea]. Universidad Autónoma del Estado de México, 2018. [Consulta: 15 Mayo 2020]. pp. 26-31. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/34607/secme-18970.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CANO, Marta. Aislantes Térmicos criterios de selección de requisitos energéticos. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería). Universidad Politécnica de Madrid, España, 2017. pp. 30-34. [Consulta: 12 Mayo 2020]. Disponible en: http://oa.upm.es/47071/1/TFG_Palomo_Cano_Marta.pdf

CARRILLO, José. *Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado.* [En línea]. Segunda Edición. Santa Rita-Venezuela: UNERMB, 2011. [Consulta: 17 Agosto 2020]. ISBN:978-980-6792-12-8. Disponible en: http://150.185.9.18/fondo_editorial/images/PDF/CUPUL/SISTEMA%20DE%20CONTROL%20%201.pdf

CELL, Mario. Control de un Generador de Pulsos, una Fuente de Voltaje-corriente y Matriz por medio del Protocolo GPIB Programado en Python. [En línea]. (Trabajo de titulación). (Ingeniería). Universidad San Francisco de Quito, Ecuador, 2013. pp.28-31. [Consulta: 16 Septiembre 2020]. Disponible en: <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/2749/1/108833.pdf>

ÇENGEL, Yunus. *Transferencia de Calor y Masa.* Tercera Edición. México : McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2007. ISBN-13: 978-970-10-6173-2. pp. 504-750.

CERVERA, Miguel; & BLANCO, Elena. *Mecánica de Estructuras Libro 1 Resistencia de Materiales*. Barcelona - España: Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2003. ISBN: 84-8301-622-2, pp. 30-50.

COMETAL. cometalsa.com. [En línea], 2020. [Consulta: 15 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.cometalsa.com/productos-y-servicios/electrodos-de-grafito>.

CRUZ, Gerardo. Automatización de Estación para Remachados de Componentes.[En línea] (Trabajo de titulación), (Tecnólogo), Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Santiago de Querétaro-México, 2017. pp. 10-12. [Consulta: 21 Junio 2020]. Disponible en: <https://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1024/274/1/ETM-JCR-2017.pdf>

CUSI, César; & SÁNCHEZ, Darío. Estudio y diseño de un prototipo para el monitoreo de acuarios utilizando tecnología Wifi (IEEE 802.11b/g/n) enfocada al IoT (Internet of things) mediante una plataforma Raspberry Pi y el sistema operativo Android. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, 2016. pp. 13-15. [Consulta: 21 Junio 2020]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16904/1/CD-7483.pdf>

DIRECT INDUSTRY. directindustry.es. [En línea] VIRTUALEXPO GROUP, 2020. [Consulta: 2 Septiembre 2020.] Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/solo-swiss-borel-swiss/product-18259-351112.html>.

BARBECHO, Juan; et al. “Diseño e Implementación de un laboratorio de instrumentación industrial”. INGENIUS. [En línea]. 2013. (Cuenca – Ecuador). pp. 1-3. [Consulta: 13 Noviembre 2019] ISSN: 1390-650X. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6019786.pdf>

DOMÍNGUEZ, Mar. Arduino y solo Arduino. *Módulo Relé 5V DC - Keyes KY019*. [En línea]. 2017. [Consulta: 15 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://soloarduino.blogspot.com/2014/01/modulo-keyes-rele-sr1y.html>.

E220-07e1, ASTM. *Standard Test Method for Calibration of Thermocouples By Comparison Techniques*.

E-230, ANSI/ASTM. *Especificaciones estándar para tablas de temperatura-fuerza electromotriz (fem) para termopares estandarizados*.

ECURED. Control automático. [En línea]. 2021. [Consulta: 17 Febrero 2021]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Control_autom%C3%A1tico

ECURED. Industria. [En línea]. 2021. [Consulta: 17 Febrero 2021]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Industria>

ECURED. Voltaje. [En línea]. 2021. [Consulta: 17 Febrero 2021]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Voltaje>

FISICALAB. Calor. [En línea]. 2021. [Consulta: 17 Febrero 2021]. Disponible en: <https://www.fisicalab.com/apartado/calor>

FLUKE. ¿Qué es la corriente? [En línea]. 2021. [Consulta: 17 Febrero 2021]. Disponible en: <https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/electrica/que-es-la-corriente>

GARCIA, M. B.; & MUÑOZ, P. E. Diseño y construcción de un horno de fundición basculante de crisol para la Facultad de Mecánica Naval. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería) Universidad Layca "Eloy Alfaro" de Manabí, Ecuador, 2013. pp. 14-16. [Consulta: 28 Abril 2020]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/3448/T-ESPEL-0594.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

GEMSA. Conductores Eléctricos - ¿Qué son y sus tipos? [En línea]. 2021. [Consulta: 17 Febrero 2021]. Disponible en: <https://gemsaid.com/component/k2/22/conductores>

GUTIÉRREZ, Gabriela. *Diseño y Construcción de un Horno de Fundición de Minerales Auríferos.* [En línea]. (Trabajo de titulación), Universidad Técnica de Machala, Ecuador, 2015. pp. 10-14. [Consulta: 28 Abril 2020]. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/1609/8/CD00059-TESIS.pdf>

HERNÁNDEZ, Rosa; & MARTÍNES, Enrique. “El Futuro de los Termómetros de Líquido en Vidrio”. Simposio de Metrología [En línea]. 2016. (Querétaro-México). pp. 2-5. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.cenam.mx/sm2016/pdf/1731.pdf>

HIDALGO, Washington. Diseño e Implementación de un Sistema de Adquisición de Señales Biométricas mediante mensajes SMS. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador, 2015. pp. 20-24. [13 Noviembre 2019]. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/3790/1/98T00060.pdf>

HUERTA, Mauricio. Academia. *INSTRUMENTOS MEDIDORES DE TEMPERATURA.* [En línea] 2012. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. Disponible en: https://www.academia.edu/12270991/INSTRUMENTOS_MEDIDORES_DE_TEMPERATURA

IMAZ, Roberto. *Fundamentos Experimentales de la Resistencia de Materiales.* [En línea]. Universidad de Cantabria, 2015. [Consulta: 12 Mayo 2020]. Disponible en: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1101/course/section/1308/Tema%202%20Resistencia.pdf>

IMPORT ACEROS. *Acero inoxidable 304.* [En línea] 2020. [Consulta: 15 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.importaceros.com/ecuador-quito/acero-inoxidable->

304/?gclid=CjwKCAiAxp-

ABhALEiwAXm6IyVShpdQ0NIMSNk7rrLDEDjvgSKUdy1z74qaXs8oZdGvAa5GyoNbgSho
CMisQAvD_BwE.

INFOPLC. *Automatizacion Industrial, Robótica e Industria 4.0.* [En línea] 2020. [Consulta: 15 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.infopl.net/noticias/item/101446-simatic-s7-1500-nuevo-controlador-y-firmware-para-la-automatizacion-de-nivel-medio-y-de-gama-alta>.

KINTEL. [En línea] Kintel S.A. de C.V., 2020. [Consulta: 28 Abril 2020]. Disponible en: <https://www.kintel.com.mx/resistencias-tipo-tubular/>.

LAB-VOLT. 2005. *CONTROL DE PROCESO DE TEMPERATURA.* [En línea]. Copyright © 2005 Lab-Volt Ltda., Canadá, 2005. pp. 23-28. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. ISBN: 2-89289-764-5. Disponible en: <http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/ManualesIng/ControlProTemp-O.pdf>

LOGICBUS. Automatización – Que es, concepto, historia y usos de la automatización. [En línea]. 2021. [Consulta: 17 Febrero 2021]. Disponible en: <https://www.logicbus.com.mx/automatizacion.php>

LOJAN, Edgar. Automatización de la Línea de Ensamble de Congeladores e Ingreso de Producto Terminado, en la Empresa Induglob s.a. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría) Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador, 2015. pp. 11-27. [Consulta: 21 Junio 2020]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7851/1/UPS-CT004688.pdf>

LOUREIRO, María; & PUJOL, José. *Taller Robótica Libre con Arduino.* [En línea]. Universidad Internacional Menéndez Pelayo, Madrid – España, 2017.[Consulta: 2 Septiembre 2020]. Disponible en: <http://educalab.es/documents/10180/640047/TallerRoboticaLibreArduino.pdf/c77adbfd-606a-4fbe-acd4-11630927b5a4>

MARTÍNEZ, Pedro Rufes. *Energía solar térmica.* [En línea]. Barcelona : Marcombo, 2010. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. ISBN 978-84-267-1558-6. Disponible en: https://books.google.com.ec/books/about/Energia_Solar_T%C3%A9rmica.html?id=fllc3xuVIUYC&redir_esc=y

MARTÍNEZ, René. Algoritmos Bioinspirados Para La Sintonización De Sistemas De Control Con Retardo. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California - México, 2018. pp. 20-26. [Consulta: 17 Agosto 2020]. Disponible en:

[https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2523/1/tesis_Mart% c3% adnez% 20Trujillo_Ren% c3% a9% 20Michel_22_oct_2018.pdf](https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2523/1/tesis_Mart%c3%adnez%20Trujillo_Ren%c3%a9%20Michel_22_oct_2018.pdf)

MEDRANO, Silvia. “Termopares”. Metas S.A. de C.V. Metrólogos Asociados, La Guía MetAs. [En línea]. 2002. (México) (7). pp. 1-4. [Consulta: 22 Abril 2020]. Disponible en: <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-02-07-TC.pdf>

MÉNDEZ, José; & SUASNAVAS, William. Diseño y Construcción de un Horno Eléctrico para el Secado de los Bobinados de Motores de hasta 10 hp. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Tecnólogo). Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, 2012. pp. 35-38. [Consulta: 28 Abril 2020]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4639/1/CD-4270.pdf>

MORENO, Adriana. SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA CALIBRACIÓN DE TERMOPARES TIPO J. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería). Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2007. pp. 3-11. [Consulta: 13 de Noviembre 2019]. Disponible en: <http://132.248.9.195/pd2008/0628328/0628328.pdf>

HOYOS, Mario; & HURTADO LÓPEZ, Andrés. “Nuevo modelo para un termómetro de alta temperatura”. Scientia Et Technica. [En línea]. 2004. (Colombia). 10(26), Pereira, , pp. 97-102. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. ISSN 0122-1701. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84911640017.pdf>

OCTALACERO. *Tubería de acero inoxidable 304 y 316.* [En línea] Copyright 2012 - 2020 OCTALSTEEL | All Rights Reserved, 2020. [Consulta: 15 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.octalacero.com/tuberia-de-acero-inoxidable-304-316>.

OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna.* [En línea]. Quinta Edición. Madrid : PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010. [Consulta: 4 Septiembre 2020]. ISBN: 978-84-8322-660-5. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/usuario/78303fe04da8e4eb340eae09f1840b2/mi_blog/r/Ingenieria_de_Control_Mode rna_Ogata_5a_ed.pdf

OMEGA. ¿Qué es un termopar? [En línea]. 2021. [Consulta: 17 Febrero 2021]. Disponible en: <https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>

PÉREZ, Julián; & GARDEY, Ana. Definición.de. [En línea] 2012. [Consulta: 11 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://definicion.de/temperatura/>.

RAFFINO, María Estela. Concepto.de. [En línea]. 2019. [Consulta: 11 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://concepto.de/temperatura/>.

RASPBERRY. Raspberry Pi. *Noobs.* [En línea] Raspberry Pi Foundation, 2020. [Consulta: 15 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/downloads/noobs/>.

RASPBERRY. Raspberry Pi 3 Modelo B +. [En línea] Raspberry Pi Foundation, [Consulta: 10 Junio 2020]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>.

RESISTENCIAS TOPE S.A. resistenciastope.com. [En línea] ©2014 Resistencias Tope, SA, 2020. [Consulta: 2 Septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.resistenciastope.com/es/11-resistencias-aire/10-resistencias-para-calentar-aire-y-gases>.

RIBA, Carles. *Diseño concurrente*. [En línea]. Barcelona : Edicions UPC, 2002. pp. 59-62. [Consulta: 12 Febrero 2021] ISBN: 84-8301-598-1. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36754/9788498800746.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

RIU, Jordi; et al. *Calibración de equipos de medida*. [En línea]. Tarragona : Universitat Rovira i Virgili., 2007. [Consulta: 28 Abril 2020]. Disponible en: <http://www.quimica.urv.es/quimio/general/calibra.pdf>

ROBALINO, Luis; & SÁNCHEZ, Amparo. *Diseño y Simulación de un Horno Eléctrico Doméstico*. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, 2016. pp. 24-26. [Consulta: 28 Abril 2020]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15184/1/CD-6959.pdf>

RODRÍGUEZ, Alberto; et al. *Caracterización de Sensores de Temperatura Termopar*. [En línea]. Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016. pp. 1-3. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/7302/RodriguezRodriguezLuis%20Alberto2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ROLLE, Kurt. *Termodinámica*. [En línea]. Sexta Edición. México : Pearson Prentice Hall, 2006. pp. 62. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=1rIBBXQhmCwC&pg=SA1-PA62&dq=pir%C3%B3metro&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjNw7OFpOjlAhXNtVkKHS6VB9AQ6AEIMDAB#v=onepage&q=pir%C3%B3metro&f=false>

SÁNCHEZ, Luis. *Diseño e Implementación de un Banco de Pruebas para el Contraste de Instrumentos de las Variables Físicas Temperatura y Presión*. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil – Ecuador, 2015. pp. 6-12. [Consulta: 12 Febrero 2021]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11408/1/UPS-GT001578.pdf>

SERWAY, Raymond; & FAUGHN, Jerry. *Física*. [En línea] México : Pearson Educación, 2001. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. ISBN 970-26-0015-4. Disponible en: <https://books.google.co.ve/books?id=KCvdzVRb4I4C&lr=&hl=es>

SIMON, George. Implementación, Control y Monitoreo de un Sistema de Riego por Goteo Subterráneo con Microcontroladores. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima – Perú, 2018. pp. 11-12. [Consulta: 10 Junio 2020]. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3610/simon-mori-george-anthony.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SUÁREZ, Víctor. *Introducción a Raspberry Pi*. [En línea]. Almería : HackLab Almería, 2020. [Consulta: 2 Septiembre 2020]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/337972157/intropi-pdf>

TECHNO INJECTION & TOOLS S. A. DE C. V. Technoinjectiontools.com. [En línea] Copyright 2019 Techno Injection & Tools SA de CV, 2020. [Consulta: 2 Septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.technoinjectiontools.com/resistencias-industriales/>.

TERMOCUPLAS CONTROL INDUSTRIAL. [En línea] © Termocuplas S.A.S., 2020. [Consulta: 2 Septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.termocuplas.com.co/product/termocupla-tipo-bayoneta/>.

TERMOCUPLAS CONTROL INDUSTRIAL. [En línea] 2020. [Consulta: 2 Septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.termocuplas.com.co/product/termocupla-con-racor-de-conexion/>.

TERMOCUPLAS CONTROL INDUSTRIAL. [En línea] 2020. [Consulta: 2 Septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.termocuplas.com.co/product/termocupla-tipo-punzon/>.

TME ELECTRONIC COMPONENTS. TME Electronic Components. *MC-9B230VA 1A1B LS ELECTRIC*. [En línea] Copyright © 2020 TME, 2020. [Consulta: 2 Septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.tme.eu/es/details/mc-9b-230vac/contactores-modulos-principales/ls-electric/mc-9b-230vac-1a1b/>.

TORRES, Jaime; & CHANOLUISA, Shirley. Diseño e Implementación de un Sistema de Control en una Planta de llenado de Tanques a Escala usando un Transmisor de Nivel y Algoritmo PID para Pruebas en el Laboratorio de Automatización Industrial. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil – Ecuador, 2015. pp. 8-20. [Consulta: 17 Agosto 2020]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10414/1/UPS-GT001470.pdf>

VARGAS, Jhon. *LA IMPORTANCIA DE CALIBRAR*. [En línea]. Cali : Centro Nacional de Desarrollo Tecnológico y Asistencia Técnica a la Industria, 2006. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/318797797_La_Importancia_de_calibrar

VEGA, Brenda; & VELÁZQUEZ, Laura. *Termopares*. [En línea]. México : Universidad Nacional Autónoma de México, 2019. [Consulta: 28 Abril 2020]. Disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/QES-Antologia_35802.pdf

VILLALBA, Mario. Sistema de Control de Temperatura para la Climatización del Quirófano y la Sala de Recuperación del Hospital Municipal Nuestra Señora de la Merced de la Ciudad de Ambato. [En línea]. (Trabajo de titulación), (Ingeniería). Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2011. pp. 24-38. [Consulta: 17 Agosto 2020]. Disponible en: https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/680/1/Tesis_t650ec.pdf

WHITMAN, William; & JOHNSON, William. *Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado*. [En línea]. Madrid : Paraninfo S.A., 2006. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. ISBN 84-283-2657-6. Disponible en:

https://books.google.com.ec/books/about/Tecnolog%C3%ADa_de_la_refrigeraci%C3%B3n_y_aire.html?id=skGScUTsO5IC&redir_esc=y

ANEXOS

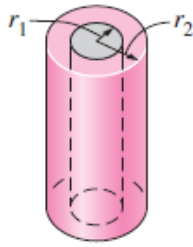
ANEXO A: Propiedades del aire a la presión de 1 atm.

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

ANEXO B: Transferencia de calor por radiación, entre dos cilindros concéntricos.

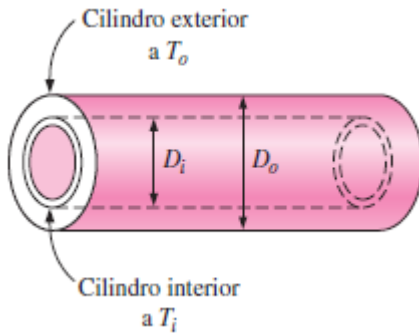


$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

$$F_{12} = 1$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$$

ANEXO C: Transferencia de calor por convección, entre dos cilindros concéntricos.



$$\dot{Q} = \frac{2\pi k_{ef}}{\ln(D_o/D_i)} (T_i - T_o) \quad (\text{W/m}) \quad (9-56)$$

La relación recomendada para la conductividad térmica efectiva es [Raithby y Hollands (1975)]

$$\frac{k_{ef}}{k} = 0.386 \left(\frac{\text{Pr}}{0.861 + \text{Pr}} \right)^{1/4} (F_{cil} \text{Ra}_L)^{1/4} \quad (9-57)$$

en donde el factor geométrico para los cilindros concéntricos, F_{cil} , es

$$F_{cil} = \frac{[\ln(D_o/D_i)]^4}{L_c^3 (D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5})^5} \quad (9-58)$$

La relación de k_{ef} en la ecuación 9-57 es aplicable para $\leq \text{Pr} \leq 6000$ y $10^2 \leq F_{cil} \text{Ra}_L \leq 10^7$. Para $F_{cil} \text{Ra}_L < 100$, las corrientes por convección natural son despreciables y por consiguiente, $k_{ef} = k$. Note que k_{ef} no puede ser menor que k y por eso debemos hacer $k_{ef} = k$ si $k_{ef}/k < 1$. Las propiedades del fluido deben evaluarse a la temperatura promedio $(T_i + T_o)/2$.

ANEXO D: Propiedades de metales sólidos.

TABLA A-3

Propiedades de metales sólidos (continuación)

Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), $k(W/m \cdot K)/c_p(J/kg \cdot K)$					
		ρ kg/m ³	c_p J/kg · K	k W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m ² /s	100	200	400	600	800	1000
Al carbono-manganeso-silicio (1% < Mn < 1.65% 0.1% < Si < 0.6%)	8 131	434	41.0	11.6				42.2 487	39.7 559	35.0 685	27.6 1 090
Aceros al cromo (bajo): $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)	7 822	444	37.7	10.9				38.2	36.7	33.3	26.9
1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)	7 858	442	42.3	12.2				42.0	39.1	34.5	27.4
1Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)	7 836	443	48.9	14.1				46.8	42.1	36.3	28.2
Aceros inoxidables:											
AISI 302		8 055	480	15.1	3.91			17.3	20.0	22.8	25.4
AISI 304	1 670	7 900	477	14.9	3.95	9.2 272	12.6 402	512 515	559 557	585 582	606 611
AISI 316		8 238	468	13.4	3.48			15.2	18.3	21.3	24.2
AISI 347		7 978	480	14.2	3.71			504 15.8	550 18.9	576 21.9	602 24.7
Plomo	601	11 340	129	35.3	24.1	39.7 118	36.7 125	34.0 132	31.4 142		

ANEXO E: Emisividad de superficies metálicas.

TABLA A-18

Emisividades de las superficies

a) Metales

Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ	Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ
Aluminio			Magnesio pulido	300-500	0.07-0.13
Pulido	300-900	0.04-0.06	Mercurio	300-400	0.09-0.12
Lámina comercial	400	0.09	Molibdeno		
Intensamente oxidado	400-800	0.20-0.33	Pulido	300-2 000	0.05-0.21
Anodizado	300	0.8	Oxidado	600-800	0.80-0.82
Bismuto brillante	350	0.34	Niquel		
Latón			Pulido	500-1 200	0.07-0.17
Intensamente pulido	500-650	0.03-0.04	Oxidado	450-1 000	0.37-0.57
Pulido	350	0.09	Platino pulido	500-1 500	0.06-0.18
Placa mate	300-600	0.22	Plata pulida	300-1 000	0.02-0.07
Oxidado	450-800	0.6	Aceros inoxidables		
Cromo pulido	300-1 400	0.08-0.40	Pulido	300-1 000	0.17-0.30
Cobre			Ligeramente oxidado	600-1 000	0.30-0.40
Intensamente pulido	300	0.02	Intensamente oxidado	600-1 000	0.70-0.80
Pulido	300-500	0.04-0.05	Acero		
Lámina comercial	300	0.15	Lámina pulida	300-500	0.08-0.14
Oxidado	600-1 000	0.5-0.8	Lámina comercial	500-1 200	0.20-0.32
Oxidado en negro	300	0.78	Intensamente oxidado	300	0.81
Oro			Estaño pulido	300	0.05
Intensamente pulido	300-1 000	0.03-0.06	Tungsteno		
Hoja brillante	300	0.07	Pulido	300-2 500	0.03-0.29
Hierro			Filamento	3500	0.39
Intensamente pulido	300-500	0.05-0.07	Zinc		
Hierro fundido	300	0.44	Pulido	300-800	0.02-0.05
Hierro forjado	300-500	0.28	Oxidado	300	0.25

ANEXO F: Emisividad de superficies no metálicas.

TABLA A-18

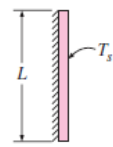
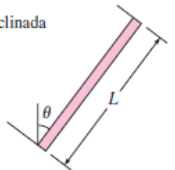
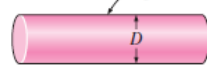
Emisividades de las superficies (conclusión)
b) No metales

Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ	Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ
Alúmina	800-1 400	0.65-0.45	Papel blanco	300	0.90
Aluminio, óxido de	600-1 500	0.69-0.41	Revoque blanco	300	0.93
Asbesto	300	0.96	Porcelana vidriada	300	0.92
Asfalto, pavimento de	300	0.85-0.93	Cuarzo, áspero, vidrio	300	0.93
Ladrillo			Caucho		
Común	300	0.93-0.96	Duro	300	0.93
De arcilla refractaria	1 200	0.75	Suave	300	0.86
Carbono, filamento de	2 000	0.53	Arena	300	0.90
Tela	300	0.75-0.90	Silicio, carburo de	600-1 500	0.87-0.85
Concreto	300	0.88-0.94	Piel humana	300	0.95
Vidrio			Nieve	273	0.80-0.90
De ventana	300	0.90-0.95	Suelo, tierra	300	0.93-0.96
Pyrex	300-1 200	0.82-0.62	Hollín	300-500	0.95
Pyroceram	300-1 500	0.85-0.57	Teflón	300-500	0.85-0.92
Hielo	273	0.95-0.99	Agua profunda	273-373	0.95-0.96
Magnesio, óxido de	400-800	0.69-0.55	Madera		
Mampostería	300	0.80	Haya	300	0.94
Pinturas			Roble	300	0.90
De aluminio	300	0.40-0.50			
Negra, laca, lustrosa	300	0.88			
De aceite, todos los colores	300	0.92-0.96			
De base (primer) roja	300	0.93			
Acrilica blanca	300	0.90			
Esmalte blanco	300	0.90			

ANEXO G: Correlaciones empíricas del número de Nusselt para la convección natural sobre superficies.

TABLA 9-1

Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies

Configuración geométrica	Longitud característica L_c	Intervalo de Ra	Nu
Placa vertical 	L	$10^4 - 10^9$ $10^9 - 10^{13}$ Todo el intervalo	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (9-21) (compleja pero más exacta)
Placa inclinada 	L		Utilícen las ecuaciones de la placa vertical para la superficie superior de una placa fría y la superficie inferior de una placa caliente Reemplácese g por $g \cos \theta$ para $Ra < 10^9$
Cilindro horizontal 	D	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (9-25)