

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE DISPOSITIVO
PARA DETERMINAR VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO
EN TRATAMIENTO TÉRMICO DE METALES**

PRESENTADO POR:

**BRYAN ENMANUEL IGLESIAS RUIZ
SERGIO RAFAEL RIVAS CORTEZ
ISRAEL OSWALDO VELADO MANCÍA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO 2024

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIA GENERAL :

Lic. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ing. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO :

Arq. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO :

M.Sc. e Ing. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE DISPOSITIVO PARA
DETERMINAR VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO EN
TRATAMIENTO TÉRMICO DE METALES**

Presentado por :

**BRYAN ENMANUEL IGLESIAS RUIZ
SERGIO RAFAEL RIVAS CORTEZ
ISRAEL OSWALDO VELADO MANCÍA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M.Sc LEYLA MARINA JIMÉNEZ MONROY

San Salvador, julio de 2024

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M.Sc. LEYLA MARINA JIMÉNEZ MONROY

AGRADECIMIENTOS.

Me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a cada uno de ustedes por su inmensurable apoyo y contribución durante el proceso de elaboración de esta tesis. Su presencia, ánimo y sabias orientaciones han sido fundamentales en este camino hacia la culminación de este proyecto académico.

A mis amigos cercanos, quienes han sido mi roca y sostén durante estos años de estudio, gracias por su constante aliento y por compartir conmigo tanto los momentos de alegría como los desafíos. Su amistad ha sido un pilar fundamental en mi vida universitaria.

A mis queridos padres, Padre Ricardo Antonio Rivas Escalante y Madre Rosa Orbelina Cortez, quienes han sido mi inspiración y guía a lo largo de toda mi vida, les agradezco infinitamente por su incondicional apoyo, amor y sacrificio. Su confianza en mí y su ejemplo de perseverancia son mi mayor motivación para seguir adelante.

A mi querida hermana Edith Roxana Rivas Cortez, a pesar de la distancia física, siempre has estado presente con tu cariño y palabras de aliento. Gracias por ser mi confidente y por creer en mí en todo momento.

A mi querido hermano, Herson Ricardo Rivas Cortez, aunque ya no estés físicamente entre nosotros, tu memoria y tu espíritu continúan inspirándome cada día. Este logro también es tuyo, y lo dedico con amor a tu memoria.

A mi Alma Mater, la Universidad de El Salvador, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y por proporcionarme los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto. Estoy profundamente agradecido por la educación de calidad que he recibido y por todas las experiencias enriquecedoras que he vivido durante mi tiempo en esta institución.

A mi distinguida asesora de tesis, M Sc e Ing. Leyla Marina Jiménez Monroy, por su invaluable orientación, paciencia y dedicación en cada etapa de este proceso. Sus conocimientos expertos y su compromiso con mi crecimiento académico han sido fundamentales para el éxito de este trabajo.

En fin, a todos aquellos que de una u otra manera han contribuido a la realización de esta tesis, les expreso mi más sincero agradecimiento. Este logro no hubiera sido posible sin su apoyo incondicional.

¡Gracias de todo corazón!

Atentamente,

Sergio Rafael Rivas Cortez

Este trabajo de graduación está dedicado a:

Mi esposa e hijo:

Mónica Morán y Nicolás Velado.

Mis padres:

Israel Velado y Virginia Mancía.

Mis hermanos:

Alejandro, Juan y Kevin.

Agradecimientos.

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi directora de tesis, Ing. M.Sc. Leyla Marina Jiménez Monroy, por su orientación, apoyo y dedicación a lo largo de este proyecto. Su experiencia y asesoramiento fueron fundamentales para alcanzar los resultados presentados en esta tesis.

Agradezco profundamente a mi familia por su amor incondicional, paciencia y constante apoyo durante mi trayectoria académica. Su sacrificio y aliento fueron la fuerza que me impulsó a superar los desafíos y completar esta investigación

Extiendo mi gratitud a mis compañeros de estudio y amigos por sus valiosas contribuciones, discusiones estimulantes y compañerismo a lo largo de este proceso. Su colaboración y ánimo fueron fundamentales para mantenerme motivado.

También agradezco a todos los profesores, expertos y profesionales del campo de la ingeniería mecánica que compartieron su conocimiento, brindaron retroalimentación y ofrecieron su tiempo para discutir ideas y resolver dudas.

En primer lugar, a Dios Todopoderoso por guiarme y aconsejarme profundamente a través de su palabra, su contenido me ha hecho ser quien soy. Por permitirme ser más de lo que pensé que sería y por todas las bendiciones y oportunidades brindadas para que hoy esté donde estoy.

Agradezco a María del Rosario Ruiz de Iglesias, mi mamá, y a René Arturo Iglesias Solano, mi papá, por todo su apoyo desde mis primeros pasos, por corregirme y enderezar mi camino. Cada una de sus muestras de afecto cobra vida cuando veo el camino por el que he andado, y veo que nunca he estado solo; sus enseñanzas me han preparado para cuando llegue el momento en el que precisamente me encuentre solo. Gracias por enseñarme el significado de lo incondicional.

A mi hermano, José Baltazar Iglesias Ruiz quien ha estado a mi lado desde siempre y me ha acompañado en todo este camino, poniéndome como prioridad en tantos aspectos, su apoyo ha sido de gran importancia para conseguir este logro.

A María Mercedes Ruiz, Dolores Isabel López, Santiago Ernesto Lima; mi familia, por el apoyo brindado a lo largo de todo este proceso, cada uno ha sido de crucial importancia para alcanzar este objetivo y no habría sido posible sin ustedes.

A Iliana Michelle Vigil Saravia, con quien quiero compartir este y muchos más logros el resto de mi vida. Gracias por estar en las buenas y en las no buenas, por asegurarse de que siga adelante en cada proyecto emprendido y por hacerme sentir que puedo conseguirlo todo.

A la M Sc. Leyla Marina Jiménez Monroy por todo su aporte a mi crecimiento académico y profesional a lo largo de la carrera, por servir como inspiración de lo que es la pasión por la docencia y el progreso del conocimiento.

A la Universidad de El Salvador y su personal, por permitirme crecer y formarme como profesional y como persona. Por expandir mi conocimiento y mis ideas, por desafiarme a pensar de formas diferentes para resolver los problemas del mañana.

Bryan Enmanuel Iglesias Ruiz.

Resumen

Existen diferentes factores que determinan el resultado final de un tratamiento térmico, entre los cuales se encuentran la temperatura máxima a la que se calienta el metal y el tiempo que éste permanece a esa temperatura. En cuanto a la temperatura, hay una influencia respecto a la distancia desde la que se mide en la cámara del horno y la ubicación del material. En relación al efecto del tiempo en el resultado del tratamiento térmico, estando el material expuesto a temperatura, radica en el crecimiento de grano, cuanto más tiempo el material se vea expuesto a determinado valor de temperatura, mayor será el crecimiento de grano, el cual, al ser excesivo, representa una desventaja al verse debilitadas propiedades como la dureza o resistencia al desgaste.

Con el objetivo de conocer el impacto que genera el control de tales variables sobre el resultado del tratamiento térmico en un material metálico, se construyó un dispositivo cuya función es la de monitorear la temperatura en un área cercana a la ubicación de la probeta (alrededor de 15 cm), comparar dicho valor de temperatura con el registrado internamente por el horno de tratamientos térmicos (alrededor de 35 cm desde la probeta) y evaluar la diferencia. Además, el dispositivo registra el tiempo desde el inicio del tratamiento hasta el final de la etapa en la que el material se mantiene a la temperatura deseada.

Como parte de la investigación, se realizaron pruebas experimentales en un acero AISI 1045 para obtener la curva de calentamiento del horno obtenida a través del termopar interno del horno y el del dispositivo. Se realizó una comparación entre ambas curvas y se observó que la temperatura medida por el termopar del horno es en promedio 66.27 °C, menor que la temperatura registrada por el termopar ubicado en el área cercana a la probeta, lo cual implica que se debe aplicar un factor de corrección a la temperatura a la cual se programa el horno para que el material que se va a calentar alcance la temperatura que se requiera de acuerdo al tipo de tratamiento térmico a aplicar.

ÍNDICE GENERAL.

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO	1
1.1. Tetraedro de Ciencia e ingeniería de materiales	1
1.2. Diagrama metaestable hierro - carburo de hierro.	2
1.3. Tratamientos térmicos en aleaciones ferrosas.	4
1.4. Microestructuras relevantes de tratamiento térmico	8
1.4.1. Perlita	9
1.4.2. Bainita.	10
1.4.3. Martensita	11
1.5. Mecanismos de transferencia de calor	11
1.5.1. Transferencia de calor por conducción.	12
1.5.2. Transferencia de calor por convección.....	14
1.5.3. Transferencia de calor por radiación	16
1.6. Transferencia de calor en el horno de la Escuela de Ingeniería Mecánica	17
1.7. Tiempo estimado de calentamiento de probetas cilíndricas para tratamiento térmico.	19
1.7.1. Curva de calentamiento de un horno	21
1.8. Sistemas electrónicos de medición de temperatura.	24
1.8.1. Medición de temperatura.....	24
1.8.2. Dispositivos comunes de medición de temperatura.	25
1.8.2.1. Termómetros.	25
1.8.2.2. Termopares.	25
1.8.2.3. Resistores sensibles a la temperatura.....	28
1.8.2.4. Pirómetros de radiación.....	29
1.9. Características estáticas y dinámicas de un dispositivo de medición de temperatura.	29
1.10. Recopilación de información relacionada con microcontroladores y lógica de programación.	32
1.10.1. Definición de microcontrolador.....	32
1.10.1.1. Características de un microcontrolador.	33
1.10.1.2. Ejemplos de microcontroladores.....	34
1.10.2. Lógica de programación.....	37
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	39
2.1. Etapa de diseño.....	47
2.2. Etapa de fabricación.....	49
2.2.1. Medición de la cámara del horno y caracterización de horno de tratamientos térmicos.	49
2.2.2. Dimensiones de los elementos electrónicos.	50
2.2.3. Planos de diseño.....	52
2.2.4. Selección de los tipos de materiales a utilizar.....	56

2.2.4.1.	Selección de material del case.	56
2.2.4.2.	Selección de materiales para soporte metálico.	58
2.3.	Diseño de código de programación.	61
2.3.1.	Diseño y elaboración de código de programación.....	61
2.3.1.1.	Prueba de caja negra.	61
2.3.1.2.	Flujograma.....	61
2.4.	Pruebas de dispositivo.....	64
CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL DISPOSITIVO.....		67
3.1.	Flujograma de diseño del dispositivo.....	67
3.2.	VARIABLES DE DISEÑO.	68
3.3.	Proceso de diseño.....	71
3.4.	Selección de materiales y elementos electrónicos.....	77
3.4.1.	Material para el case.....	77
3.4.2.	Material para el soporte.....	77
3.4.3.	Magnitud física objetivo.....	89
3.4.4.	Dispositivos sensor.	89
3.4.5.	Lectura e interpretación.....	90
3.4.6.	Circuito integrado receptor de la información.....	91
3.4.7.	Visualización.	92
CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE.....		93
4.1.	Proceso de construcción.	93
4.1.1.	Construcción de case.....	93
4.1.1.1.	Fabricación.....	95
4.1.1.2.	Montaje de elementos en el gabinete.....	95
4.1.2.	Elementos y su conexión.	95
4.1.2.1.	Termopar.....	95
4.1.2.2.	Transmisor MAX6675 para termocupla tipo K.	96
4.1.2.3.	Pantalla LCD 16x4.....	97
4.1.2.4.	Teclado matricial.....	98
4.1.2.5.	Diagrama de conexión de los elementos eléctricos.....	99
4.1.3.	Fabricación de soporte.....	99
CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		101
5.1.	Pruebas de funcionamiento de pantallas del dispositivo.....	101
5.2.	Presentación y análisis de resultados.....	103
5.2.1.	Curva de calentamiento termocupla interna vs. Termocupla de dispositivo.....	108
5.3.	Procedimiento de instalación.....	115
5.3.1.	Instalación de módulo electrónico.....	117
5.3.2.	Instalación de soporte metálico para probetas.....	118
5.3.3.	Instalación de termopar.....	120

5.4. Procedimiento de operación	121
III. CONCLUSIONES	128
IV. RECOMENDACIONES.....	130
V. BIBLIOGRAFÍA	131
VI. ANEXOS.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS.

Ilustración 1 Sección de aceros del diagrama Fe- Fe ₃ C.	2
Ilustración 2 Diagrama Temperatura-Tiempo-Transformación.	6
Ilustración 3 Diagrama de transformación de fases.	9
Ilustración 4 Microestructura perlítica.	10
Ilustración 5 Microestructura bainítica.....	10
Ilustración 6 Microestructura martensita.	11
Ilustración 7 Conducción de calor a través de una placa.....	13
Ilustración 8 Tipos de convección.	15
Ilustración 9 Cámara de horno de tratamiento térmicos.	18
Ilustración 10 Representación de horno de tratamientos térmicos a 800°C.	19
Ilustración 11 Curva de calentamiento del horno.	24
Ilustración 12 Tipos comunes de dispositivos de medición de temperatura.	25
Ilustración 13 Relación de voltaje de función de la temperatura para los tipos de termopares comunes.	27
Ilustración 14 Tipos comunes de termopares usados en la industria.....	27
Ilustración 15 Respuesta de un dispositivo de medición de temperatura con respecto al tiempo.....	32
Ilustración 16 Formato de registro de dimensiones y caracterización del horno de tratamientos térmicos.....	40
Ilustración 17 Formato de registro de temperatura y tiempo del horno.	43
Ilustración 18 Curva de calentamiento.	45
Ilustración 19 Dimensiones de Pantalla LCD 16x4.	50
Ilustración 20 Dimensiones de teclado matricial.	51
Ilustración 21 Dimensiones de placa Arduino.	51
Ilustración 22 Dimensiones de módulo MAX6675.....	52

Ilustración 23 Dimensiones de case.	53
Ilustración 24 Dimensiones de tapa del case.	53
Ilustración 25 Dimensiones de una de las patas del soporte.	54
Ilustración 26 Chapa metálica del soporte.	55
Ilustración 27 Materiales para impresión 3D.	57
Ilustración 28 Caja negra para la elaboración de código de dispositivo.	61
Ilustración 29 Flujograma de funcionamiento de dispositivo.	63
Ilustración 30 Formato de registro de temperatura de horno y dispositivo vs tiempo.	65
Ilustración 31 Flujograma de diseño de dispositivo.	68
Ilustración 32 Elementos electrónicos.	74
Ilustración 33 Dimensiones de probeta.	79
Ilustración 34 Perfil de lámina para soporte.	81
Ilustración 35 Análisis de carga estática por fuerza y temperatura.	83
Ilustración 36 Fuerzas sobre placa horizontal del soporte.	84
Ilustración 37 Diagrama de cuerpo libre.	84
Ilustración 38 Representación 3D de soporte y fuerzas.	86
Ilustración 39 Sumatoria de momentos sobre pata de soporte.	86
Ilustración 40 Case con tapa.	94
Ilustración 41 Case con elementos electrónicos.	94
Ilustración 42 Conexión de módulo MAX6675 a termopar tipo K.	96
Ilustración 43 Conexiones del módulo MAX6675.	96
Ilustración 44 Conexiones de display LCD 16x4.	97
Ilustración 45 Módulo de display LCD 16x4.	97
Ilustración 46 Teclado matricial 4x4.	98
Ilustración 47 Conexiones de teclado matricial.	98

Ilustración 48 Esquema de conexión de los elementos electrónicos.	99
Ilustración 49 Dimensiones de chapa metálica.	100
Ilustración 50 Soporte diseñado en SolidWorks.....	100
Ilustración 51 Soporte construido con acero AISI 304.	100
Ilustración 52 Pantalla de inicio.....	101
Ilustración 53 Pantalla de recopilación de información.	102
Ilustración 54 Pantalla de inicio de prueba.	102
Ilustración 55 Dimensiones y caracterización del horno de tratamientos térmicos.	104
Ilustración 56 Registro de temperaturas vs tiempo.	106
Ilustración 57 Registro de datos temperatura interna vs termopar de dispositivo.	109
Ilustración 58 Registro de datos de termopar interno vs. Termopar de dispositivo.	112
Ilustración 59 Comparativa de la diferencia de medición.	115
Ilustración 60 Puertos de módulo.....	117
Ilustración 61 Conexión USB desde una computadora portátil.	117
Ilustración 62 Conexión desde adaptador de teléfono móvil 5V.	118
Ilustración 63 Compuerta de horno de tratamientos térmicos Universidad de El Salvador.....	118
Ilustración 64 Soporte ubicado en cámara de horno de tratamientos térmicos de la Universidad de El Salvador.	119
Ilustración 65 Cierre de compuerta de horno de tratamientos térmicos.	119
Ilustración 66 Guarda de horno de tratamientos térmicos.	120
Ilustración 67 Termopar insertado en mirilla de horno de tratamientos térmicos.	120

Ilustración 68 Pantalla de energización de inicio de dispositivo.....	121
Ilustración 69 Pantalla de inicio de dispositivo.....	121
Ilustración 70 Pantalla de ingreso de parámetros.....	122
Ilustración 71 Case con display LCD y teclado matricial.....	122
Ilustración 72 Pantalla para ingresar tiempo de prueba.....	123
Ilustración 73 Pantalla de inicio de prueba.....	123
Ilustración 74 Pantalla registro parámetros.....	124
Ilustración 75 Pantalla de inicio de prueba.....	125
Ilustración 76 Pantalla de pausa de prueba.....	125
Ilustración 77 Pantalla de registro total.....	126
Ilustración 78 Pantalla principal.....	126
Ilustración 79 Pantalla de registro de nuevos datos para prueba.....	126
Ilustración 80 Pantalla de reinicio de proceso.....	127

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1. Tetraedro de Ciencia e ingeniería de materiales

En el vasto dominio de la metalurgia física, se abordan una diversidad de temas de estudio, todos con un propósito común: entender a fondo el comportamiento de los metales.

Es crucial reconocer que las propiedades de los metales están intrínsecamente ligadas a una serie de factores interrelacionados, como la microestructura del material, su composición química y los procesos a los que se somete durante su fabricación y uso, cuya importancia se detalla a continuación:

- I. La microestructura de un metal, especialmente la resultante de la transformación de la austenita, es un factor determinante que abarca aspectos como la disposición de los granos, las fases presentes y la presencia de defectos cristalinos. La microestructura tiene una influencia considerable en las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas del material.
- II. La composición química de un metal también desempeña un papel crucial en sus propiedades finales. La adición de elementos de aleación puede tener un impacto drástico en la resistencia, ductilidad, resistencia a la corrosión y otras características del material.
- III. El procesamiento de los metales también es un factor determinante en sus propiedades. Cada etapa de fabricación, desde la fundición hasta los

tratamientos térmicos y los procesos de acabado, influye en la estructura y las propiedades del material resultante.

1.2. Diagrama metaestable hierro - carburo de hierro.

El diagrama de fases hierro-carbono, es una herramienta crucial en la metalurgia y la ciencia de materiales que representa las fases presentes en una aleación de hierro y carbono en función de la temperatura y la composición. La representación gráfica del intervalo de los aceros en el diagrama metaestable Fe-Fe₃C, se muestra en la ilustración 1.

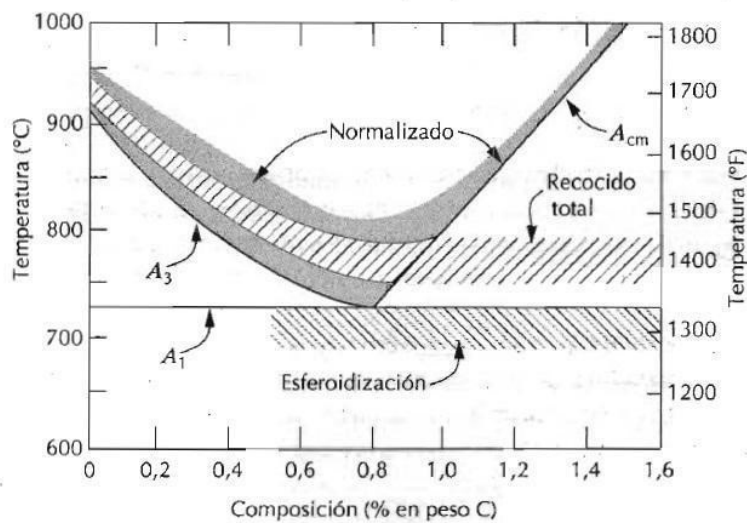


Ilustración 1 Sección de aceros del diagrama Fe- Fe₃C.

Las fases principales en la microestructura de un acero son:

- I. **Ferrita (α -Fe):** Es una fase de hierro puro que puede disolver una pequeña cantidad de carbono en su red cristalina en forma de solución sólida. En condiciones normales, es estable a temperaturas bajas y bajas concentraciones de carbono.

- II. **Cementita (Fe_3C):** Es un compuesto intermetálico que contiene un 6.7% de carbono en peso. Es extremadamente dura y frágil. Suele encontrarse en forma de partículas dentro de la matriz de ferrita y su cantidad y distribución influye en las propiedades mecánicas de las aleaciones hierro-carbono.
- III. **Austenita ($\gamma\text{-Fe}$):** Es una fase de hierro que puede disolver una cantidad considerable de carbono, especialmente a altas temperaturas. Es no magnética y tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo. Es estable a altas temperaturas y altas concentraciones de carbono.

Las líneas A_3 y A_{CM} en la sección de acero en el diagrama Fe- Fe_3C marcan temperaturas críticas importantes y están asociadas con transformaciones de fase específicas:

- I. **Línea A_3 :** Representa la temperatura a la cual la austenita comienza a formarse durante el calentamiento de una aleación hierro-carbono. Es el punto en el cual la ferrita se transforma en austenita y varía con el contenido de carbono del acero.
- II. **Línea A_{CM} :** Marca la temperatura (del lado hipereutectoide), a la cual se segrega cementita a partir de la austenita producto del cambio de solubilidad, durante el enfriamiento de la aleación.

Transformaciones asociadas con las líneas A_3 y A_{CM} :

- I. **Calentamiento (Austenización):** Cuando la temperatura del acero hipoeutectoide alcanza la línea A_3 , la ferrita se transforma en austenita mientras se calienta.
- II. **Enfriamiento (Transformación Eutectoide):** Durante el enfriamiento, una vez que la temperatura desciende por debajo de la línea A_{CM} , la austenita comienza a descomponerse, segregando cementita. A la temperatura eutectoide, da lugar a la formación de microestructuras como la perlita (una mezcla alterna de ferrita y cementita) o estructuras más complejas dependiendo de la velocidad de enfriamiento y la composición de la aleación.

1.3. Tratamientos térmicos en aleaciones ferrosas.

Los tratamientos térmicos se clasifican en dos tipos

- I. Tratamientos con enfriamiento lento.
 - II. Tratamientos con enfriamiento rápido.
-
- I. **Tratamientos con enfriamiento lento:** Consisten en una austenización seguida de un enfriamiento controlado, generalmente en horno o al aire, de modo de producir microestructuras próximas a las de equilibrio. Dentro de esta clasificación se incluyen los procesos denominados normalizado o recocidos.

A. Normalizado: Se realiza calentando 55 a 85 °C por encima de la temperatura crítica superior, que naturalmente depende de la composición como lo indica en la ilustración 2. Consiste en el enfriamiento al aire desde la región austenítica A_3 ; el acero queda con una estructura y propiedades que arbitrariamente, se consideran como normales y características de su composición.

La velocidad exacta de enfriamiento depende del tamaño de la pieza a enfriar, del número de piezas en la carga del horno y de la circulación del aire alrededor de las mismas. Al limitar parcialmente la difusión, la formación de ferrita libre en los aceros hipoeutectoides, se suprime parcialmente, resultando una cantidad de perlita ligeramente más elevada que en equilibrio. La limitación del proceso de difusión, también provoca la aparición de perlita de láminas finas.

En la ilustración 2, se representa en líneas de puntos el curso del tratamiento en el diagrama TTT de un acero SAE 1045. Cuando el objetivo del tratamiento es eliminar el defecto de formación de bandas separadas de ferrita y perlita, la difusión debe ser aún más limitada, lo que se consigue enfriando más rápidamente, es decir, utilizando como medio de enfriamiento, aire agitado.

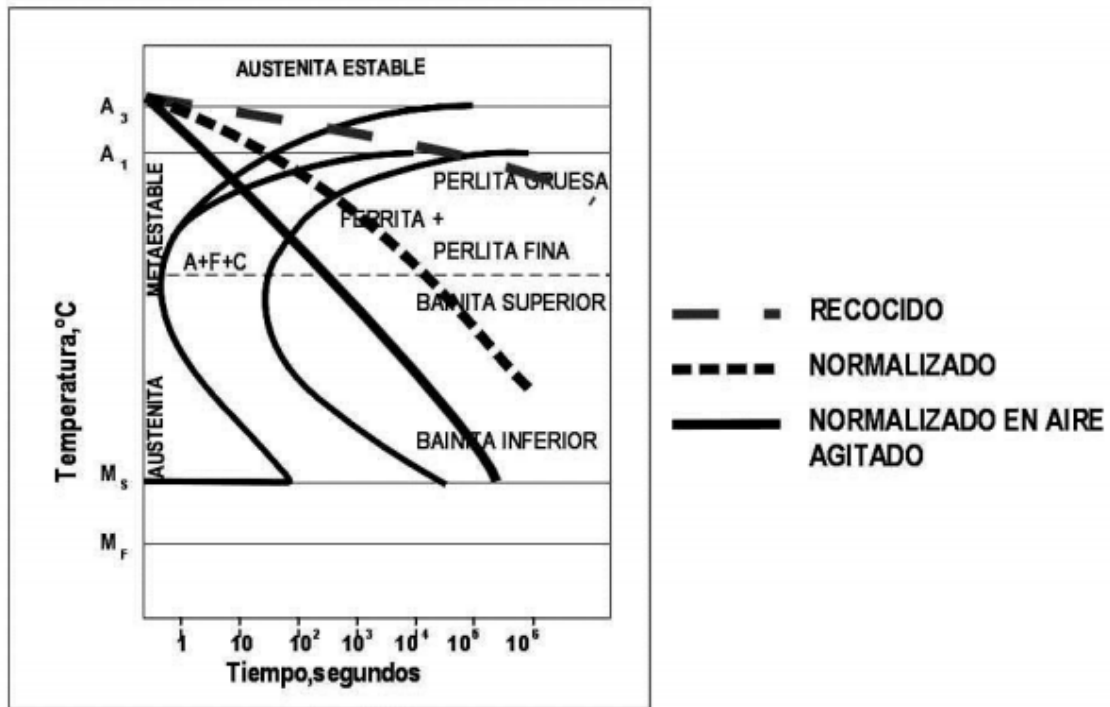


Ilustración 2 Diagrama Temperatura-Tiempo-Transformación.

B. Recocido: consiste en un tratamiento con enfriamiento lento, en horno, desde la fase austenítica. Retomando la ilustración 2 (líneas de punto y raya), cuando se trata del recocido de aceros hipereutectoides, el calentamiento debe realizarse sólo ligeramente por encima de la temperatura eutectoide para evitar la formación de una red de cementita en los límites de grano de la austenita, que fragiliza el material. Como se puede observar en el diagrama de enfriamiento continua, de un acero hipoeutectoide, la estructura queda constituida por ferrita proeutectoide (libre, en bordes de grano) y perlita gruesa, en granos más grandes que los obtenidos durante el normalizado. Las cantidades relativas de los

constituyentes se obtienen con gran aproximación por medio de un análisis de fases en el diagrama Fe-Fe₃C

II. **Tratamientos con enfriamiento rápido:** El tratamiento de enfriamiento rápido, también conocido como temple, es un proceso térmico utilizado para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales, como la dureza y la resistencia. Este tratamiento generalmente implica calentar el material a una temperatura crítica y luego enfriarlo rápidamente para lograr una estructura cristalina específica

A. Temple: Retomando la ilustración 2, para realizar un temple en un acero hipoeutectoide, se debe de calentar la pieza a una temperatura por arriba de la línea A₃, dependiendo de la cantidad de carbono en el acero. Por otra parte, durante el temple, toda la masa de acero debe encontrarse en estado austenítico en el momento de comenzar el enfriamiento. Si éste se realiza con suficiente rapidez, no dando lugar a la difusión de átomos de carbono, la transformación de la austenita ocurrirá recién por debajo de los 350°C y todo el material quedará con gran dureza debido a la aparición de un nuevo constituyente en la microestructura denominado martensita.

B. Revenido de la martensita: Los aceros después del temple suelen quedar demasiado duros y frágiles para los usos a que van a ser destinados. Estos inconvenientes se corrigen con un revenido, el cual consiste en el calentamiento a una temperatura inferior a la crítica A1, enfriándose luego generalmente al aire. El objeto del revenido no es eliminar los efectos del temple sino modificarlos, disminuyendo la fragilidad, aumentando la tenacidad y eliminando también las tensiones internas que quedan siempre en los aceros templados. Su efecto principal es disminuir la tetragonalidad de la red; además tiene un beneficioso efecto sobre la austenita retenida que pueda hallarse presente. Todo esto en detrimento de la dureza y la resistencia. El revenido se produce como consecuencia de la inestabilidad de la martensita, que tiende a volver a las fases estables (ferrita y carburo) cuando es calentada.

1.4. Microestructuras relevantes de tratamiento térmico

Según lo estudiado previamente, podemos afirmar que la transformación de la austenita puede ocurrir tanto por enfriamiento lento como rápido. Como resultado, se forman distintas microestructuras: la perlita y la bainita en el caso del enfriamiento lento, y la martensita en el caso del enfriamiento rápido. Estas transformaciones se producen tras una reacción eutectoide, así como se muestra en la ilustración 3.

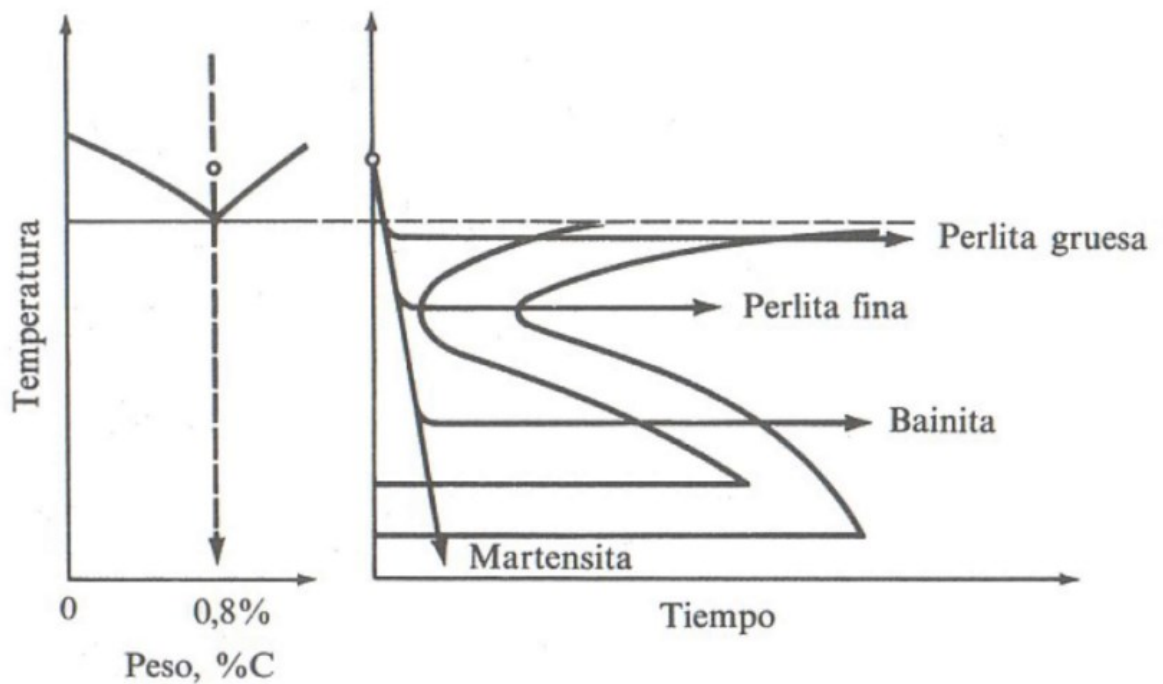


Ilustración 3 Diagrama de transformación de fases.

1.4.1. Perlita

Es una mezcla de capas alternas de ferrita y cementita (Ilustración 4). Se forma durante el enfriamiento lento de una aleación eutéctica de hierro-carbono. La perlita tiene propiedades mecánicas intermedias entre la ferrita y la cementita.

Se puede mencionar que en enfriamiento lento se puede obtener dos tipos de perlita:

Perlita gruesa: Se forma para enfriamientos suficientemente lentos, a temperatura próximas al eutéctico (727°C), y se corresponde con láminas de ferrita y cementita.

Perlita fina: A medida que la transformación ocurre a temperaturas más bajas, como 600°C , las láminas de la perlita se hacen más delgadas, pasando a denominarse perlita fina.

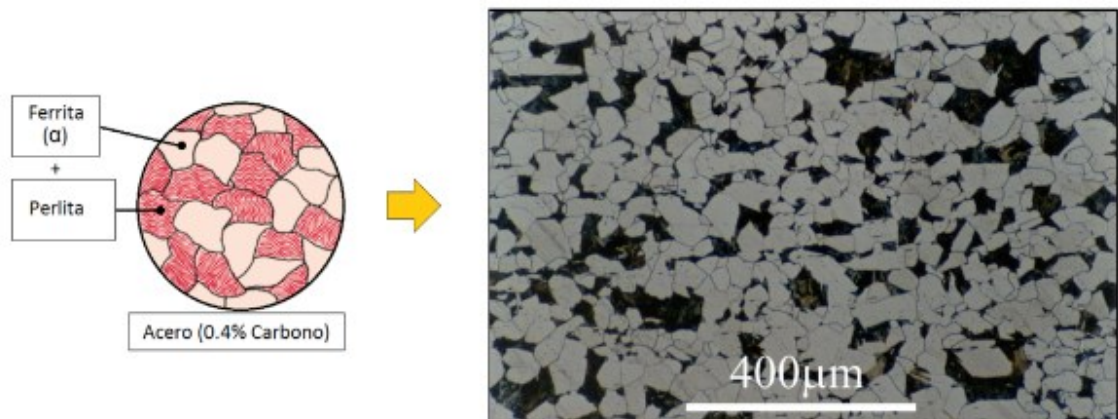


Ilustración 4 Microestructura perlítica.

1.4.2. Bainita.

A temperaturas entre 200 y 540 °C, se forma una estructura denominada bainita, ver ilustración 5 que consiste en finas agujas o placas de ferrita separadas de largas hojas delgadas de cementita:

En la región de la bainita, la velocidad de transformación es controlada por el crecimiento del grano por difusión. Pero a esa temperatura baja, la difusión es muy lenta y ello da origen a una estructura muy fina.

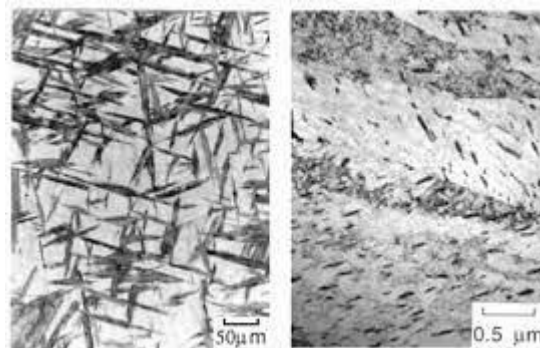


Ilustración 5 Microestructura bainítica.

1.4.3. Martensita

Se forma a bajas temperaturas ($< 215^{\circ}\text{C}$) resultado de una transformación sin difusión de la austenita, ilustración 6. Se produce una reordenación colectiva de los átomos de Fe y C, pasando de la estructura cúbica de caras centradas de la austenita a una estructura tetragonal centrada en el cuerpo, correspondiente a la martensita. Al no implicar difusión, ocurre casi instantáneamente y depende únicamente de la temperatura.

La velocidad de transformación martensítica depende únicamente de la temperatura a la que se la aleación es enfriada rápidamente durante el temple.

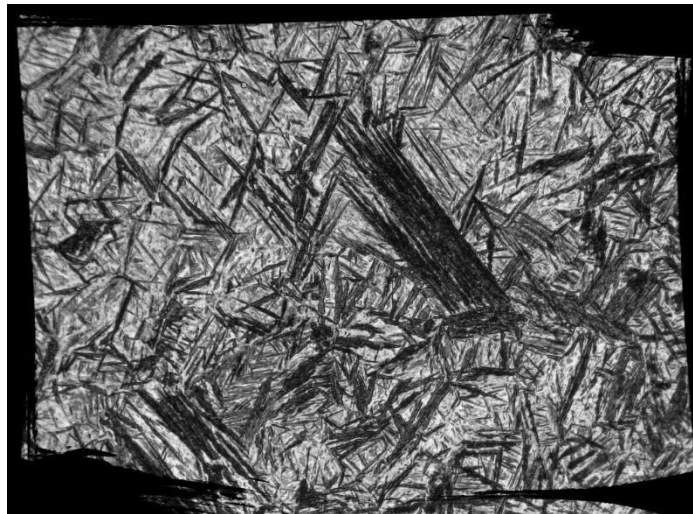


Ilustración 6 Microestructura martensita.

1.5. Mecanismos de transferencia de calor

Basándose en los conocimientos generales de termodinámica, se conoce al calor como la forma de energía que se transfiere de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura, y que, además, dicho fenómeno ocurre desde el medio con mayor temperatura hacia el medio con menor temperatura. Dicha

transferencia se puede llevar a cabo a través de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación.

1.5.1. Transferencia de calor por conducción.

Según (Incropera, 1999) al pensar en conducción, automáticamente deberá pensar en conceptos de actividad molecular, debido a que a esa escala hay procesos que se traducen eventualmente en transferencia de energía. El incremento de temperatura de un material implica un aumento en el movimiento y agitación de los átomos que lo conforman, al chocar estos átomos con sus átomos vecinos, parte de la energía cinética es transferida desde los átomos más activos hacia los de menor actividad, dando lugar así a un incremento en sus vibraciones y por ende un aumento de temperatura; de modo que la energía se ha trasladado desde un punto de mayor temperatura hacia un punto de menor temperatura.

En la ilustración 7 se observa una placa de metal de espesor Δx y con un área A , ambos extremos de la placa se encuentran a diferentes valores de temperatura siendo $T_1 > T_2$. Con base en la experimentación, se ha determinado que la razón de conducción de calor a través de la placa aumenta cuanto mayor es el gradiente de temperatura entre ambos puntos de la placa, así mismo si se incrementa el área de transferencia.

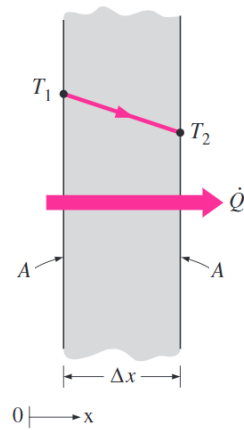


Ilustración 7 Conducción de calor a través de una placa.

Por el contrario, si se aumenta la distancia entre el punto 1 y el punto 2, la razón de transferencia disminuye, de modo que: la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa.

En términos matemáticos la ecuación 1 representa la transferencia de calor por conducción:

$$Q \propto \frac{AT_1 - T_2}{\Delta x}$$

$$Q = k \frac{AT_1 - T_2}{\Delta x}$$

$$Q = -k \frac{A \Delta T}{\Delta x}$$

Ecuación 1 Transferencia de calor por conducción.

Dónde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad del material para conducir el calor.

1.5.2. Transferencia de calor por convección.

Este mecanismo se caracteriza por ocurrir entre un sólido y el fluido que se encuentra a su alrededor, ya sea líquido o gas. La transferencia se compone del efecto de conducción junto con el movimiento del fluido; si el fluido no se mueve, la transferencia de calor ocurre únicamente por conducción.

- I. **Convección natural:** Ocurre por el desplazamiento de las masas de fluido debido a la variación de densidad en el mismo provocado por la diferencia de temperatura, las masas de fluido ascienden a medida que aumenta la temperatura puesto que se vuelve menos denso.
- II. **Convección forzada:** a diferencia de la convección natural, esta ocurre cuando las masas de fluido son desplazadas por causa de un medio externo, ya sea un ventilador, una bomba o diferencias de presión que generan corrientes a través de la superficie de transferencia, ver ilustración 8.

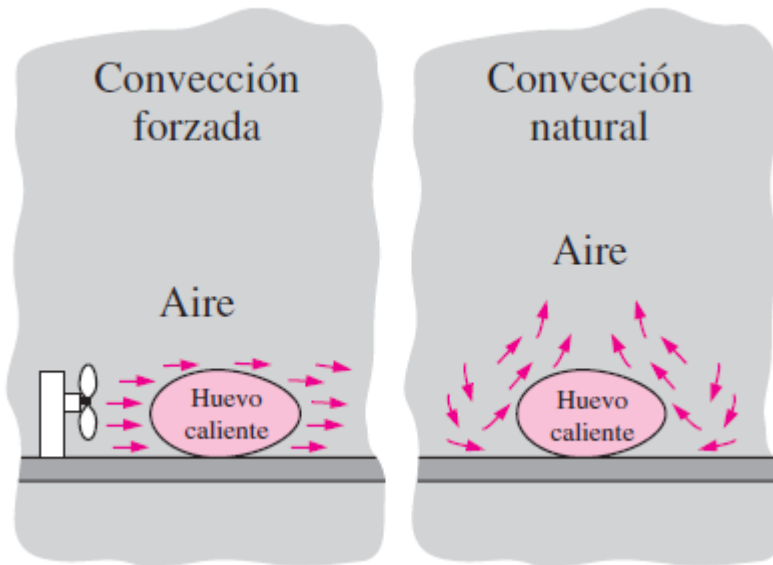


Ilustración 8 Tipos de convección.

En términos matemáticos, la transferencia de calor por convección se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton en la ecuación 2 tal que:

$$Q_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_{\infty})$$

Ecuación 2 Transferencia de calor por convección.

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor

A_s : Área de transferencia de calor

T_s : Temperatura de la superficie de transferencia

T_{∞} : Temperatura del fluido

Con base en el comportamiento de la ecuación anterior se puede concluir que:

- Cuanto mayor sea el valor del coeficiente de transferencia de calor, mayor será el calor cedido o absorbido de la superficie.
- Las características dimensionales del sólido son determinantes en cuanto a la cantidad de calor que se ha de transferir.
- Cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas entre la superficie del sólido y el fluido, mayor será la cantidad de calor cedido o absorbido de la superficie.

1.5.3. Transferencia de calor por radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La transferencia de calor por radiación no precisa de un medio material para producirse, debido a que es por causa de las ondas electromagnéticas, es la forma más rápida de transferir calor ya que viaja a la velocidad de la luz.

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie una determinada temperatura es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann, se expresa en la ecuación 3:

$$Q_{\text{emitida,máx}} = \sigma A_S T_S^4$$

Ecuación 3 Ley de Stefan-Boltzmann.

Donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

La superficie capaz de emitir este valor de radiación se le conoce como cuerpo negro y a la radiación emitida por éste se le conoce como radiación de cuerpo negro.

En la realidad, la radiación emitida por todas las superficies es menor a la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. La disminución de dicho valor se ve afectada por un factor llamado emisividad representada como ϵ en la ecuación 4.

$$Q_{\text{emitida}} = \epsilon \sigma A_S T_S^4$$

Ecuación 4 Transferencia de calor por radiación.

La emisividad, cuyo valor está entre cero y uno, es una medida de cuan próxima está una superficie de emitir igual que un cuerpo negro, siendo $\epsilon=1$ para este caso.

Los mecanismos de transferencia de calor actúan en simultáneo dependiendo de las circunstancias, en sólidos opacos ocurre únicamente la conducción, en sólidos semitransparentes ocurre conducción y radiación; por otro lado, entre un sólido y un fluido puede ocurrir la convección y/o la radiación. En un fluido estático, la transferencia de calor puede ser por conducción y/o radiación si se encuentra estático, por convección y/o radiación en un fluido que fluye.

1.6. Transferencia de calor en el horno de la Escuela de Ingeniería

Mecánica

El horno de tratamientos térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica funciona por medio de resistencias eléctricas que se encuentran ubicadas en las paredes

de éste (ver ilustración 9), a través de ellas fluye una corriente eléctrica que, debido al efecto Joule, disipa la energía en forma de calor.

La transferencia de calor que ocurre desde la resistencia hacia la probeta es a través de la radiación y la conducción (considerado el aire como un fluido estático), puesto que las capas de aire adyacentes a las paredes van incrementando su temperatura y transfieren el calor hacia el interior.

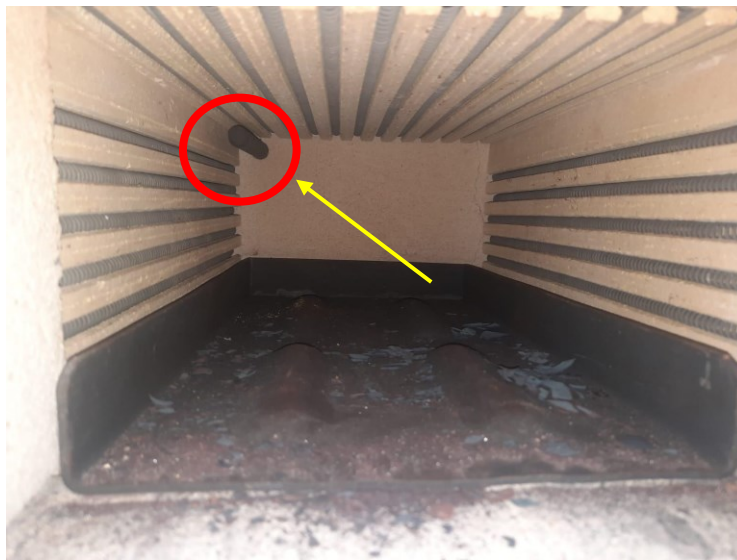


Ilustración 9 Cámara de horno de tratamiento térmicos.

La pieza señalada en la ilustración 9 es la termocupla interna del horno a través de la cual éste va midiendo y regulando su temperatura de acuerdo con el valor programado. A medida que la temperatura en el interior incrementa, ver Ilustración 10, la termocupla registra este valor y lo compara con el valor seleccionado en el indicador digital de temperatura; al alcanzar el valor requerido, el sistema se detiene para no incrementar más la temperatura, por otro lado, si

el valor disminuye, nuevamente es accionado el circuito de manera automática para que la temperatura sea restablecida.

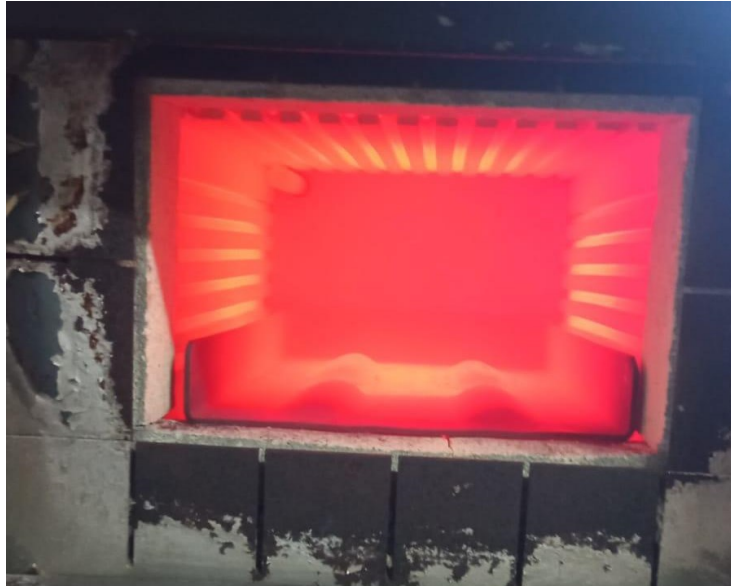


Ilustración 10 Representación de horno de tratamientos térmicos a 800°C.

1.7. Tiempo estimado de calentamiento de probetas cilíndricas para tratamiento térmico.

Para poder llevar a cabo un correcto calentamiento en una pieza cilíndrica es necesario conocer el tipo de acero y la concentración de carbono que posee, para primero definir el intervalo de temperatura a la cual se realizará la austenización. Luego, considerando que el calentamiento se hará en probetas cilíndricas se deberá tener en cuenta su diámetro para estimar un tiempo aproximado de calentamiento y mantención a la temperatura seleccionada.

Retomando la ilustración 1, el intervalo de temperatura para la austenización varía según el porcentaje de carbono en el acero. Pero por lo general para aceros

hipoeutectoides es de 30 a 50 °C por arriba de la línea de temperatura crítica superior A_3 . Para aceros hipereutectoides al carbono puro, la temperatura de austenización suele estar entre las líneas A_{cm} y $A_{3,1}$.

El tiempo de calentamiento se puede calcular a partir de las expresiones de transferencia de calor. Con ecuaciones de este tipo y basándose en experimentaciones, se ha encontrado que, para los aceros al carbono, el tiempo de calentamiento es proporcional al diámetro y se puede determinar con la ecuación 5.

$$t(D) = \frac{2}{75}D + \frac{2}{3}$$

Ecuación 5 Tiempo de calentamiento.

Donde el tiempo “t” se obtendrá en horas y el diámetro “D” será expresado en milímetros “mm”.

Después del calentamiento, el acero estará en estado austenítico, pues se espera que toda la pieza se encuentre a la misma temperatura del horno. En ese momento se empieza a contar el verdadero tiempo de mantención; en ese periodo se debe lograr la difusión del carbono y disolver los carburos en hierro gamma y se debe uniformar el tamaño de grano. Para los aceros ordinarios al carbono y los estructurales de baja aleación, el tiempo de sostenimiento depende del tamaño de la pieza y puede determinarse el tiempo de calentamiento mediante la ecuación 6.

$$t(D) = 15 + \frac{D}{2}$$

Ecuación 6 Tiempo de calentamiento para aceros de baja aleación.

Donde el tiempo “t” se obtiene en minutos y el diámetro “D” será expresado en milímetros “mm”.

La ecuación anterior es utilizada para piezas con espesores menores de 25 mm; si la sección es mayor, el tiempo mínimo es media hora, además se puede utilizar la ecuación 7:

$$t(D) = \frac{1}{2} + \frac{D}{120}$$

Ecuación 7 Tiempo de calentamiento en probetas con sección mayor a 25 mm.

Donde el tiempo “t” se obtendrá en horas y el diámetro “D” será expresado en milímetros “mm”.

1.7.1. Curva de calentamiento de un horno

En el ámbito de los tratamientos térmicos, la curva de calentamiento es una herramienta fundamental para comprender y controlar el proceso de calentamiento, al proporcionar información detallada sobre cómo cambia la temperatura en el interior de la cámara del horno respecto al tiempo.

Una curva de calentamiento es un gráfico que muestra la relación entre la temperatura y el tiempo durante el proceso de calentamiento de un material o un sistema en un horno. Representa visualmente cómo la temperatura cambia a medida que se le suministra calor a lo largo del tiempo, es una medida de estimación respecto a las condiciones internas de la cámara.

Para calcular una curva de calentamiento, se registran periódicamente las mediciones de temperatura a intervalos regulares de tiempo. Estos datos se representan en un gráfico donde el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical representa la temperatura. Posteriormente, se traza una línea o curva suavizada a través de los puntos para visualizar la tendencia general del calentamiento.

Utilidad de la Curva de Calentamiento

En cuanto a su utilidad en un tratamiento térmicos se tienen los siguientes puntos:

- I. Optimización del proceso:** Permite ajustar los parámetros del proceso, como la velocidad de calentamiento, la temperatura máxima alcanzada y la duración del tratamiento, para lograr resultados óptimos en términos de propiedades físicas y mecánicas del material.
- II. Control de calidad:** Sirve como una herramienta de control de calidad al proporcionar una representación visual del proceso de calentamiento. Cualquier desviación inesperada de la curva predeterminada puede indicar problemas en el proceso que deben abordarse para su corrección.
- III. Eficiencia energética:** Permite identificar oportunidades para mejorar la eficiencia energética al optimizar el proceso de calentamiento, lo que puede reducir el consumo de energía y los costos operativos.

Algunas características generales de una curva de calentamiento incluyen:

1. **Fase de calentamiento inicial:** Se observa un aumento gradual en la temperatura a medida que se supera la inercia térmica del interior del horno como las paredes y componentes, representado en la ilustración 11 como etapa 1. El lento aumento de la temperatura puede deberse, además, por la evaporación de la humedad presente en el aire contenido en interior de la cámara
2. **Meseta:** En algunos casos, la curva puede mostrar un período en el que la temperatura se mantiene constante antes de continuar aumentando. Esto puede deberse a cambios de fase en el material o a la necesidad de mantener una temperatura constante para ciertas etapas del proceso.
3. **Ritmo de calentamiento:** La pendiente de la curva de calentamiento indica la velocidad a la que el material está siendo calentado. Este ritmo puede ajustarse según los requisitos del proceso y las propiedades del material. En la ilustración 11, se obtiene calculando la diferencia entre dos valores de temperatura divididos por el tiempo transcurrido entre ambos valores. Debido a que la curva representada no posee una pendiente constante, podría calcularse la velocidad de calentamiento promedio al calcular la diferencia entre los valores final e inicial de temperatura y dividirlos por el tiempo total desde el inicio al final del calentamiento.
4. **Punto de temperatura objetivo:** La curva puede alcanzar un punto de temperatura objetivo, que marca el final del proceso de calentamiento y el inicio de otras etapas del tratamiento térmico, como el mantenimiento de

la temperatura o el enfriamiento. De acuerdo con lo representado en la ilustración 11, temperatura objetivo para este caso es de 900 °C.

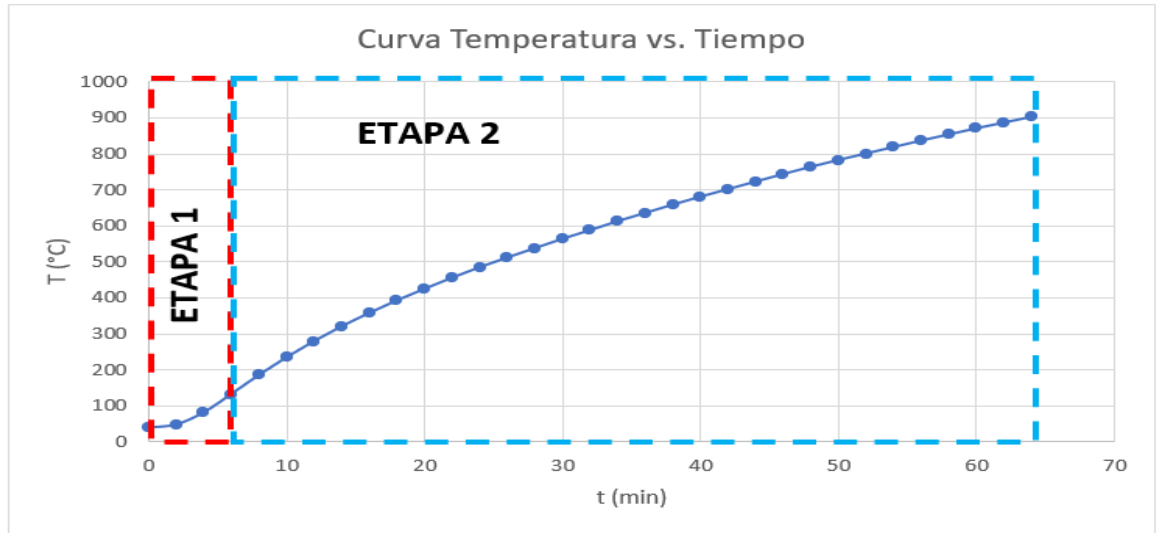


Ilustración 11 Curva de calentamiento del horno.

1.8. Sistemas electrónicos de medición de temperatura.

1.8.1. Medición de temperatura.

La temperatura puede medirse mediante el efecto que se tiene sobre una cantidad termométrica, dicho en otras palabras, una cantidad que cambia con la temperatura. Una cantidad termométrica puede ser, por ejemplo, la expansión lineal de un líquido o la resistencia eléctrica de un metal.

En la ilustración 12 podemos observar los dispositivos comúnmente utilizados para medir la temperatura en procesos industriales.

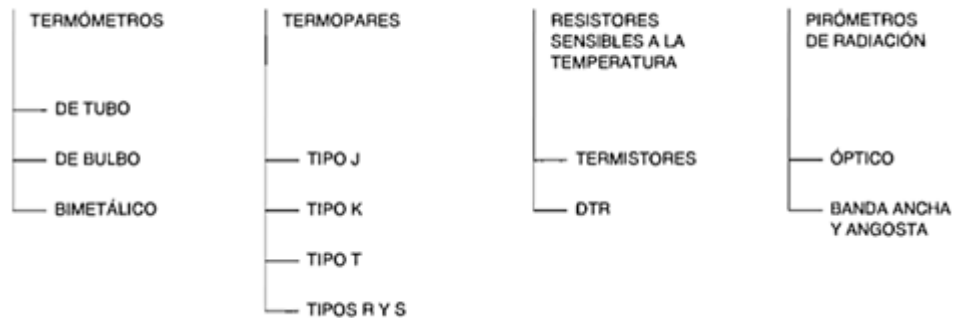


Ilustración 12 Tipos comunes de dispositivos de medición de temperatura.

1.8.2. Dispositivos comunes de medición de temperatura.

1.8.2.1. Termómetros.

Los termómetros proveen una lectura visual directa de la temperatura. Los termómetros de tubo suministran una indicación de la temperatura basándose en la expansión y contracción de un fluido con la temperatura. Los termómetros de bulbo proveen una indicación de la temperatura basándose en la variación en la presión de un fluido con la temperatura. Los termómetros bimetalicos proveen una indicación de la temperatura basándose en la expansión y contracción debida a la temperatura de dos piezas de metal unidas.

1.8.2.2. Termopares.

Un termopar es un elemento primario que se utiliza para medir temperatura. El termopar consta de un par de alambres hechos de metales o aleaciones diferentes que están unidos en un extremo para formar una junta.

Cuando existe una diferencia de temperatura entre la junta y los extremos abiertos de los alambres, se genera un pequeño voltaje de unos pocos milivoltios

en tales extremos debido al efecto Seebeck. La magnitud del voltaje generado depende de la diferencia de temperatura entre la junta y los extremos abiertos de los alambres, y de la composición de los alambres.

Tipos de termopares.

Hay varios tipos de termopares usados en la industria. Cada tipo se identifica por una letra que indica una relación específica entre el voltaje y la temperatura.

La ilustración 13 por ejemplo, muestra la relación entre la temperatura de la junta y el voltaje generado para los tipos de termopares más comunes. La temperatura de la junta se mide con respecto a una temperatura de referencia de 0°C, la cual corresponde al punto de fusión del hielo.

Los termopares tipo J y K son más sensibles que los termopares tipo R y S. Esto implica que el voltaje generado por los tipos J y K variará más que el generado por los tipos R y S ante una variación dada en la temperatura de la junta. Sin embargo, los tipos J y K tienen un rango de medición de temperatura más angosto que los tipos R y S.

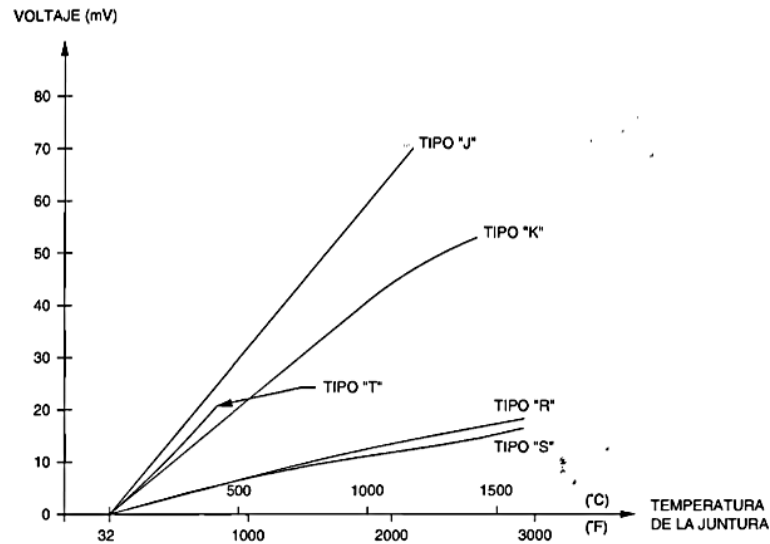


Ilustración 13 Relación de voltaje de función de la temperatura para los tipos de termopares comunes.

Como lo muestra la ilustración 14, es una práctica común asociar cada tipo de termopar con una composición de alambre particular, aunque hablando en sentido estricto, un tipo de termopar más bien se refiere a una relación voltaje contra temperatura específica.

TIPO DE TERMOPAR	COMPOSICIÓN DE LOS DOS ALAMBRES
J	Hierro-constantan
K	Cromo-aluminio
R o S	Platino-platino/rodio
T	Cobre-constantan

Ilustración 14 Tipos comunes de termopares usados en la industria.

1.8.2.3. Resistores sensibles a la temperatura.

a. Detectores de temperatura resistivos (DTR).

Un detector de temperatura resistivo (DTR) es un elemento primario que se utiliza para medir temperatura. El DTR trabaja sobre el principio de que la resistencia eléctrica de los metales cambia con la temperatura.

El DTR consta de un conductor metálico usualmente enrollado en una bobina. El DTR se conecta a un circuito eléctrico para hacer que una corriente de excitación constante fluya a través de él. Mientras la temperatura aumenta, la resistencia eléctrica del conductor metálico aumenta y, por tanto, el voltaje sobre el DTR aumenta.

Como consecuencia, midiendo el voltaje sobre el DTR, se puede obtener una señal proporcional a la temperatura del mismo. Esta señal se puede acondicionar en una corriente, voltaje o presión con un rango normalizado que sea adecuada para instrumentación y control, formándose así un transmisor de temperatura por la combinación del OTR y el circuito de acondicionamiento.

b. Termistores.

Los termistores son sensibles son sensores de temperatura, los cuales su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura. Existen dos tipos de termistor: NTC (Negative Temperature Coefficient) y PTC (Positive Temperature Coefficient). Estos dispositivos son fabricados a partir de los óxidos metálicos (manganeso, cobalto,

cobre y níquel), es decir, un semiconductor que deja pasar parcialmente la corriente. El término proviene de (Thermally Sensitive Resistor).

1.8.2.4. Pirómetros de radiación.

Los pirómetros de radiación miden la temperatura de un cuerpo basándose en el tipo o cantidad de energía electromagnética radiada por el cuerpo. No requieren contacto directo con el cuerpo. Se usan principalmente en aplicaciones donde se experimentan altas temperaturas, como en cuartos crematorios.

1.9. Características estáticas y dinámicas de un dispositivo de medición de temperatura.

Dependiendo de la aplicación particular de la medición de temperatura que queremos realizar, así deberá ser la decisión de cuál dispositivo a utilizar, teniendo en cuenta las características estáticas y dinámicas de dicho dispositivo.

a. Características estáticas.

Las características estáticas expresan la calidad del dispositivo de medición de temperatura bajo condiciones de estado de régimen estacionario. Entre ellas se incluyen, por ejemplo, la exactitud, la resolución, la sensibilidad y la banda muerta.

La exactitud es una indicación de cuán cerca está la señal producida por el dispositivo de medición de temperatura a la temperatura real que está siendo medida.

La resolución es el intervalo más pequeño que puede discriminar el dispositivo de medición de temperatura.

La sensibilidad es una medida del cambio en la señal de temperatura provista por el dispositivo para un cierto cambio en la temperatura medida.

Finalmente, la banda muerta es el rango sobre el cual puede variar la temperatura medida sin causar ningún cambio notable en la señal de salida del dispositivo de medición de temperatura.

b. Características dinámicas.

Las características dinámicas expresan la calidad del dispositivo de medición de temperatura bajo condiciones transitorias. Describen qué tan rápido reacciona el dispositivo ante un cambio escalón de la temperatura medida. Entre las características dinámicas se encuentran el tiempo muerto, la constante de tiempo y el tiempo de elevación.

Las características dinámicas de un dispositivo de medición de temperatura se pueden determinar creando un cambio repentino (escalón) en la temperatura medida. El nivel de la señal producida por el dispositivo de medición de temperatura se registra luego con respecto al tiempo.

La ilustración 15 muestra un ejemplo de la respuesta dinámica de un dispositivo de medición de temperatura con respecto al tiempo:

El tiempo muerto es el intervalo de tiempo entre el instante en el que ocurre el cambio escalón (t_0) en el instante en el que el nivel de la señal generada por el dispositivo de medición de temperatura comienza a cambiar.

La constante de tiempo (T) es el tiempo que se requiere para que el nivel de la señal generada por el dispositivo de medición de temperatura alcance el 63,2% del cambio total que sigue al cambio escalón en la temperatura. El nivel alcanza el valor de estado de régimen estacionario final después de cinco constantes de tiempo.

Finalmente, el tiempo de elevación (t_e) es el tiempo que se requiere para que el nivel de la señal generada por el dispositivo de medición de temperatura pase desde el 10 % hasta el 90 % del valor final de estado estacionario.

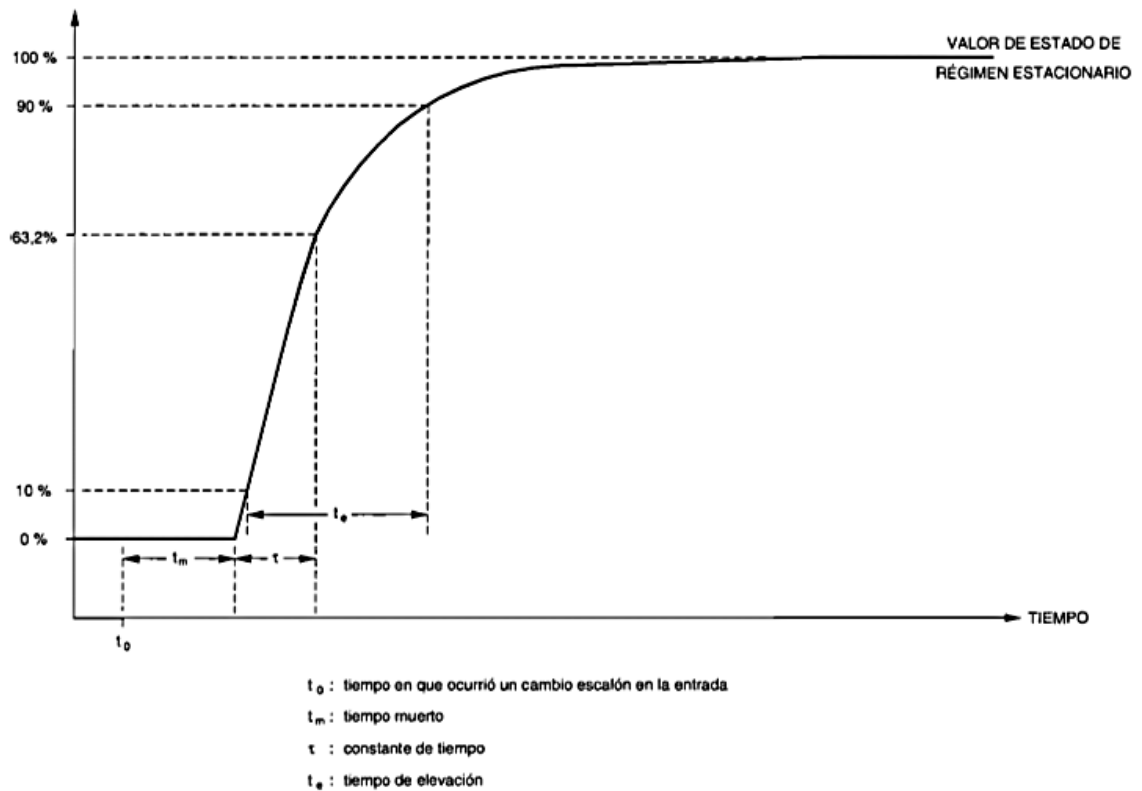


Ilustración 15 Respuesta de un dispositivo de medición de temperatura con respecto al tiempo.

1.10. Recopilación de información relacionada con microcontroladores y lógica de programación.

1.10.1. Definición de microcontrolador.

Un microcontrolador es un dispositivo compacto y altamente integrado que contiene un procesador central, memoria y periféricos de entrada/salida. Está diseñado para realizar tareas específicas en sistemas embebidos, como controlar electrodomésticos, sistemas de comunicación, dispositivos médicos, automóviles, juguetes y una amplia variedad de aplicaciones.

1.10.1.1. Características de un microcontrolador.

- I. **Procesador Central (CPU):** El corazón del microcontrolador que ejecuta instrucciones y realiza operaciones.
- II. **Memoria:** Almacena programas y datos temporales. La memoria puede ser dividida en dos tipos principales: memoria de programa (donde se almacenan las instrucciones del programa) y memoria de datos (donde se almacenan datos temporales).
- III. **Periféricos de Entrada/Salida (I/O):** Facilitan la interacción del microcontrolador con el entorno. Estos periféricos pueden incluir puertos GPIO (Entrada/Salida de Propósito General), puertos de comunicación (como UART, SPI, I2C), temporizadores, convertidores analógico-digitales (ADC), convertidores digital-analógicos (DAC), entre otros.
- IV. **Oscilador:** Proporciona la señal de reloj necesaria para sincronizar las operaciones del microcontrolador.
- V. **Unidad de Control:** Supervisa y controla las operaciones internas del microcontrolador, asegurando un funcionamiento coherente y eficiente.
- VI. **Interfaz de Programación:** Permite cargar el código (programa) en la memoria de programa del microcontrolador.

1.10.1.2. Ejemplos de microcontroladores.

Arduino: Arduino es una plataforma de desarrollo que utiliza microcontroladores. Algunos de los modelos más comunes son Arduino Uno, Arduino Nano, Arduino Mega, entre otros. Estos microcontroladores son conocidos por su facilidad de uso y son ampliamente utilizados en proyectos de prototipado rápido y educación. A continuación, se describe su hardware y su software:

- I. **Hardware:** Arduino utiliza placas de desarrollo que incorporan microcontroladores AVR de Atmel (actualmente parte de Microchip Technology). Estas placas de desarrollo vienen en diferentes formas y tamaños, como Arduino Uno, Arduino Nano, Arduino Mega, y más. Estas placas proporcionan entradas y salidas digitales y analógicas, interfaces de comunicación, y una manera fácil de conectar sensores, actuadores y otros componentes electrónicos.
- II. **Software:** Arduino también proporciona un entorno de desarrollo integrado (IDE por sus siglas en inglés) que facilita la programación de estas placas. El IDE de Arduino utiliza un lenguaje de programación basado en C/C++, pero simplifica muchas de las complejidades para hacerlo más accesible para principiantes

Raspberry Pi: Aunque la Raspberry Pi es más conocida como una computadora de placa única (SBC), incorpora un procesador ARM que incluye funciones de

microcontrolador. Puede realizar tareas similares a un microcontrolador y también ejecutar sistemas operativos completos como Linux. A continuación, se describen las partes del hardware de la Raspberry Pi.

- I. **Procesador (CPU):** La Raspberry Pi utiliza procesadores ARM de diferentes modelos según la versión. Por ejemplo, la Raspberry Pi 4 tiene un procesador Broadcom BCM 2711 con cuatro núcleos Cortex-A72.
- II. **Memoria RAM:** La cantidad de RAM también varía entre los modelos. La Raspberry Pi 4, por ejemplo, viene con opciones de 2 GB, 4 GB y 8 GB de RAM.
- III. **Puertos USB:** Las Raspberry Pi suelen tener varios puertos USB para conectar periféricos como teclados, ratones, cámaras, discos duros, etc.
- IV. **Puerto HDMI:** Utilizado para conectar la Raspberry Pi a un monitor o televisor.
- V. **Ranura para tarjeta microSD:** La mayoría de las Raspberry Pi almacenan su sistema operativo y datos en una tarjeta microSD.
- VI. **Puerto Ethernet:** Permite la conexión por cable a una red.
- VII. **Conectividad Inalámbrica:** Modelos recientes, como la Raspberry Pi 3 y 4, incluyen Wi-Fi integrado y Bluetooth.
- VIII. **GPIO (Entrada/Salida de Propósito General):** Encabezado GPIO que permite la conexión de sensores, actuadores y otros dispositivos electrónicos.

- IX. Conector de Alimentación:** Utilizado para suministrar energía a la Raspberry Pi.
- X. Soporte para Cámara y Pantalla:** Algunos modelos tienen conectores específicos para cámaras y pantallas Raspberry Pi.

Software de Raspberry Pi:

La Raspberry Pi es compatible con varios sistemas operativos. Raspbian (basado en Debian) ha sido el sistema operativo oficial, pero otros también son compatibles. Aquí hay elementos clave relacionados con el software:

- I. Sistema Operativo:** Raspbian (renombrado a Raspberry Pi OS) es el sistema operativo oficial, pero otros como Ubuntu, Fedora, y sistemas especializados para proyectos específicos también son utilizados.
- II. Entorno de Desarrollo:** La Raspberry Pi es compatible con varios lenguajes de programación y entornos de desarrollo. Python es muy popular, pero también se pueden utilizar C, Java y otros.
- III. Tienda de Aplicaciones:** La Raspberry Pi tiene su propia tienda de aplicaciones (Pi Store) y es compatible con la instalación de software desde repositorios de Debian.
- IV. Configuración y Administración:** La configuración y administración de la Raspberry Pi se realiza mediante herramientas proporcionadas en el

sistema operativo, como el programa de configuración de Raspberry Pi (raspi-config).

- V. Actualizaciones del Sistema:** La Raspberry Pi se puede mantener actualizada mediante comandos de actualización y actualización del sistema operativo.
- VI. Comunidad y Soporte:** La comunidad de Raspberry Pi es activa y ofrece foros y recursos en línea para obtener ayuda y compartir conocimientos.

1.10.2. Lógica de programación.

La programación de microcontroladores a menudo se realiza en lenguajes como C o ensamblador, y el conocimiento detallado del hardware es esencial para desarrollar aplicaciones robustas y eficientes. A continuación, se mencionan conceptos y consideraciones fundamentales en la lógica de programación para microcontroladores:

- I. Comprensión del Hardware:** Antes de comenzar a programar, es crucial entender la arquitectura del microcontrolador, sus periféricos y sus capacidades. Esto incluye conocer los puertos de entrada/salida, temporizadores, convertidores analógico-digitales, y otros componentes específicos.
- II. Estructuras de Control de Flujo:** Utiliza estructuras de control de flujo como bucles (for, while) y condicionales (if, else, switch) para controlar la

ejecución del programa. Estas estructuras son esenciales para tomar decisiones y repetir tareas en función de las condiciones.

- III. Entradas y Salidas (I/O):** La manipulación de entradas y salidas es clave en la programación de microcontroladores. Aprende a leer valores de pines de entrada y escribir valores en pines de salida para interactuar con el entorno.
- IV. Temporización y Contadores:** Los temporizadores y contadores son herramientas importantes en microcontroladores. Pueden utilizarse para generar retrasos, medir intervalos de tiempo y controlar la frecuencia de eventos.
- V. Interrupciones:** Comprende y utiliza las interrupciones para manejar eventos externos de manera eficiente. Las interrupciones permiten que el microcontrolador responda de inmediato a eventos específicos sin esperar a que termine la ejecución de un programa principal.
- VI. Manejo de Memoria:** Dado que los microcontroladores a menudo tienen recursos limitados, como la memoria RAM y Flash, es esencial gestionar estos recursos eficientemente. Aprende a trabajar con variables locales y globales de manera eficaz.
- VII. Optimización de Código:** La optimización del código es importante en microcontroladores para garantizar un uso eficiente de los recursos. Esto incluye la minimización del uso de memoria, la optimización de operaciones matemáticas y la selección de algoritmos eficientes.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En el desarrollo de la presente investigación se aplicó una metodología cuantitativa, enfocada en recopilar y analizar datos numéricos para establecer relaciones causales entre las variables.

Con este fin, se realizaron visitas al Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, para la obtención de parámetros y variables que definirán el diseño del dispositivo.

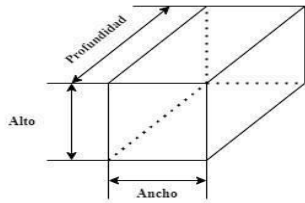
A partir de la identificación del problema de investigación, se partió de la idea inicial para el diseño del dispositivo, de colocar en el interior de la cámara de calentamiento, un soporte sobre el cual se colocarán las probetas. Las dimensiones internas del horno son determinantes al momento de diseñar el soporte del dispositivo.

Por tanto, para el registro de características dimensionales del horno de tratamientos térmicos se llenó el formato mostrado en la ilustración 16



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Formato de registro de dimensiones y caracterización del horno de
 tratamientos térmicos**



Alto [m]	
Ancho [m]	
Profundidad [m]	
Voltaje [v]	
Amperios [a]	
Potencia [kW]	
Temperatura máxima [°C]	

Ilustración 16 Formato de registro de dimensiones y caracterización del horno de tratamientos térmicos.

Asimismo, se recolectó información respecto al funcionamiento del horno, registrando el cambio de temperatura del horno respecto al tiempo con el objetivo de obtener la curva de calentamiento que servirá como línea base sobre la temperatura medida por el termopar interno del horno. Para ello se utilizó el formato presentado en la ilustración 17 en el cual se registró la información de temperatura y tiempo, partiendo de la temperatura registrada por el horno al momento de iniciar la prueba.

Para los ensayos, se utilizó una probeta fabricada en acero AISI 1045, acero simple hipoeutectoide con 0.45% de C, debido a su disponibilidad en el mercado, cuya temperatura de austenización se encuentra por encima de 780 °C.

De acuerdo a las especificaciones técnicas provistas por fabricantes de acero, para el tratamiento térmico del AISI 1045 se recomiendan temperaturas máximas de calentamiento entre 820 °C y 845 °C. Dichos valores permitieron determinar tanto la temperatura a la cual se realizarán las pruebas y la temperatura máxima que debe alcanzar el horno, que es la temperatura a la cual se programará el horno para llevar a cabo el calentamiento del mismo, tal como se presenta en el formato de la ilustración 17.

Basándose en la temperatura recomendada por el fabricante de aceros, se definió que, para la prueba de calentamiento, la temperatura hasta la cual deberá llegar el horno para el desarrollo de la prueba fuera de 900 °C.

La prueba inició en tiempo $t = 0$ minutos y la temperatura registrada en este tiempo fue a la que se encontraba el horno en ese momento, el registro de temperatura se realizó en intervalos de 2 minutos hasta alcanzar 900 °C.

Se seleccionó este intervalo de tiempo para garantizar la mayor cantidad de puntos de muestreo en primera instancia, siendo la primera prueba se necesitaba obtener la mayor cantidad de información posible que permitiera realizar un análisis detallado del cambio de la temperatura en relación con el tiempo.


 <p style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA Formato de registro de temperatura y tiempo del horno. </p>	
Temperatura de seteo (°C): 900	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	
2	
4	
6	
8	
10	
n	

Ilustración 17 Formato de registro de temperatura y tiempo del horno.

La tolerancia promedio de temperatura para hornos de tratamientos térmicos puede variar dependiendo de la aplicación específica y del tipo de horno utilizado. Sin embargo, en general, los hornos de tratamiento térmico suelen tener una tolerancia de temperatura de alrededor de +/- 10 °C.

Lo anterior significa que la temperatura en el horno puede fluctuar hasta 10 °C por encima o por debajo del punto de ajuste deseado sin afectar significativamente la calidad del proceso de tratamiento térmico.

Con base en lo anterior puede estimarse que la temperatura más alta que alcanzaría el horno es de 910 °C y que el mínimo de temperatura a alcanzar sería de 890 °C al momento de llegar a la temperatura de seteo del horno; esta consideración de máximos y mínimos marcan la diferencia en la cantidad de tiempo que la probeta permanecerá en el interior de la cámara antes de llevar a cabo el proceso de enfriamiento, puesto que el objetivo del calentamiento es homogeneizar la fase austenítica en el caso de los aceros hipoeutectoides tal como el seleccionado para la determinación de la temperatura de seteo.

Una vez realizada la prueba y registrados los datos de temperatura y tiempo, se procedió a graficar todos los puntos medidos y de esta manera obtener la curva característica de calentamiento del horno de tratamientos térmicos.

Posterior a la obtención de la gráfica, se realizó el análisis de la curva de calentamiento. Se tomó como ejemplo los datos registrados de un horno de tratamientos térmicos fabricado como trabajo de grado, (Juan Carlos Alfaro Aguilar, 1995), y para los datos que se han de registrar en el desarrollo de la prueba, se espera una tendencia similar a la registrada en ese trabajo de grado, los cuales se presentan en la ilustración 18.

Temperatura (°C)	Tiempo (min.)
55	1.36
110	3.27
165	5.07
220	6.78
275	8.74
330	10.82
385	12.77
440	14.73
495	16.90
550	19.21
605	22.29
660	26.29
715	32.20
770	40.10
825	52.02
880	66.33
935	81.26

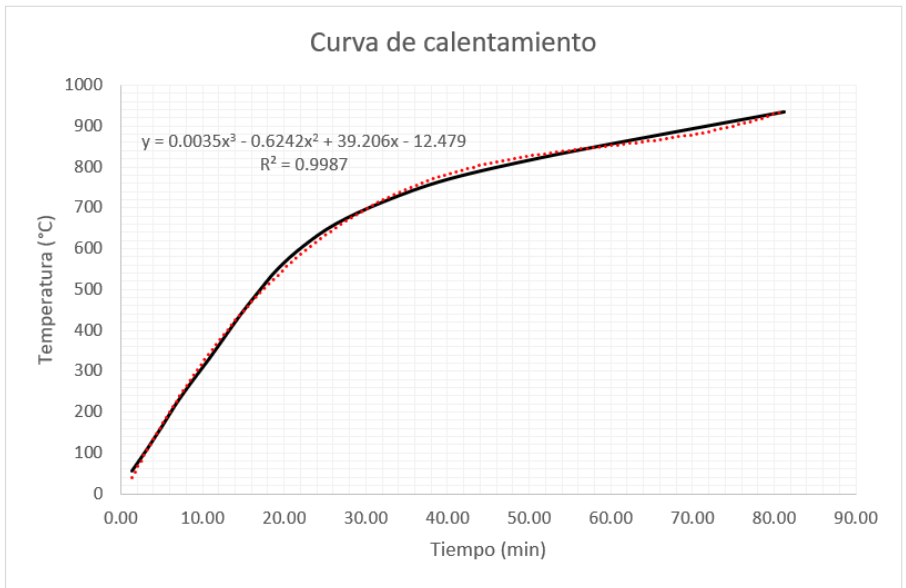


Ilustración 18 Curva de calentamiento.

Se realizó un análisis de regresión ajustando la tendencia de la curva a una forma polinómica, en este caso en particular resultó ser una ecuación polinómica de tercer grado, tal como la curva discontinua color rojo mostrada en la ilustración 2-3. El valor de $R^2=0.9987$ indica que el ajuste de los datos tiene una aproximación muy cercana al 100% con respecto a los datos reales, por lo tanto, la ecuación mostrada en la ilustración 18, puede considerarse una buena aproximación para describir el comportamiento de la curva de calentamiento del horno sujeto a este análisis.

Con los datos obtenidos durante esta experiencia, puede obtenerse también la velocidad de calentamiento conforme a la ecuación 8, la cual entrega como resultado el valor promedio en que crece la temperatura por unidad de tiempo de acuerdo con la temperatura medida por el termopar del horno:

$$\text{Velocidad de calentamiento} = \frac{\text{temperatura máxima} - \text{temperatura de inicio}}{\text{tiempo de calentamiento}}$$

Ecuación 8 Velocidad de calentamiento.

Donde:

Temperatura máxima: es la temperatura más alta registrada durante la prueba.

Temperatura de inicio: es el valor de temperatura al inicio de la prueba

Tiempo de calentamiento: es el tiempo que ha transcurrido desde el inicio de la prueba hasta alcanzar la temperatura máxima.

2.1. Etapa de diseño.

El desarrollo de esta etapa inició determinando las variables clave de las cuales depende el diseño y selección de los diferentes componentes del dispositivo, tal como características dimensionales, temperatura y material de la probeta con la que se realizaron las pruebas.

Como primer paso luego de la conceptualización de la idea, se procedió a establecer las dimensiones del soporte para probetas, a especificar las propiedades estructurales de acuerdo a las características dimensionales y de forma de la cámara del horno, además evaluar la manera en la que se apoyará sobre la parte inferior de la cámara de modo que tenga estabilidad, por lo que se va a especificar la altura a la que deberán estar posicionadas las probetas para la medición de la temperatura.

Para el cálculo del espesor de lámina de la cual estará fabricado parte del soporte, se realizó un análisis de cuerpo libre de la placa, simulando a la placa como una viga sometida a la fuerza debida al peso de las probetas y a su propio peso además de la influencia de las reacciones debido a los apoyos en ambos lados. Posteriormente se calculó la fuerza debida al peso de las probetas, que para efectos de las pruebas se realizó con dos probetas, conociendo el diámetro, espesor y material. Además, se obtendrá la fuerza debida al peso del material de la caja que soportará las probetas

Se obtuvo la deformación total que corresponde a la deformación por causa de la temperatura más la deformación por causa de las fuerzas que actúan sobre la placa.

Basándose en el hecho de que el cálculo se realizó para dos probetas, se obtendrá el espesor mínimo requerido de la lámina que permita soportar este número de probetas bajo esas condiciones de temperatura.

Por otro lado, se realizó la selección del material del cual estará fabricado el soporte tomando en cuenta que debe mantener sus propiedades estructurales ante relativas altas temperaturas, así como una adecuada resistencia a la corrosión por efecto de la alta temperatura y la atmósfera no controlada del horno.

Con respecto al medidor de temperatura, se seleccionó el tipo de termopar a utilizar considerando las condiciones de temperatura, además, definir la selección de implementos electrónicos que permitirán la conversión de la información captada por el termopar a información que pueda ser interpretada por el usuario del dispositivo. Debido a que un termopar se encarga de convertir un cambio de temperatura en una diferencia de potencial; se debe elegir elementos auxiliares que transformen esta diferencia de potencial en un valor numérico y que sean compatibles con el termopar seleccionado. Se evaluaron diversas alternativas que cumplieran con estos requerimientos.

Además, se estableció cuál será el tipo de lenguaje de programación con el cual se dará instrucciones a la tarjeta electrónica para la conversión de datos, cuya entrada será la diferencia de potencial proporcionada por el termopar y su salida

será el valor de temperatura que se tiene al interior de la cámara en la zona focalizada de las probetas. Con el lenguaje de programación establecido se generó el código que se va a insertar en el microcontrolador para la conversión de datos.

Asimismo, en esta etapa se realizó la evaluación y selección del tipo de pantalla a través de la cual se va a visualizar el valor de temperatura percibido por el termopar. A su vez, se evaluaron alternativas respecto a elementos de ingreso de datos, específicamente un teclado que permitiera operar el dispositivo, como acciones para iniciar o detener el proceso de medición, así como también ingresar datos que requiere el circuito interno para su funcionamiento.

De igual manera, se realizó el diseño del módulo en el cual estará instalado el circuito electrónico, se va a definir la distribución de los elementos tanto en el interior como en el exterior y con base en eso se procederá a su fabricación.

2.2. Etapa de fabricación.

Una vez determinadas las dimensiones de la cámara del horno y las dimensiones y propiedades que debe tener el soporte, se procederá a su fabricación.

2.2.1. Medición de la cámara del horno y caracterización de horno de tratamientos térmicos.

Para obtener las medidas de la cámara del horno, se llevaron a cabo visitas al Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Salvador, con objeto de medir las dimensiones del mismo, utilizando para tal efecto, una cinta métrica, con una resolución de un milímetro.

Posteriormente, Se tomaron datos de su placa caracterizar el horno, estos resultados de medición y caracterización se registraron en los formatos establecidos en la ilustración 16.

2.2.2. Dimensiones de los elementos electrónicos.

Para determinar las dimensiones de los módulos que integran el dispositivo, se consultaron los manuales técnicos correspondientes a cada uno de ellos. Estos incluyen el módulo de la pantalla LCD16x4, el teclado matricial, Arduino y el módulo Max6675.

Las dimensiones en milímetros de la Pantalla LCD 16x4, se muestran en la ilustración 19.

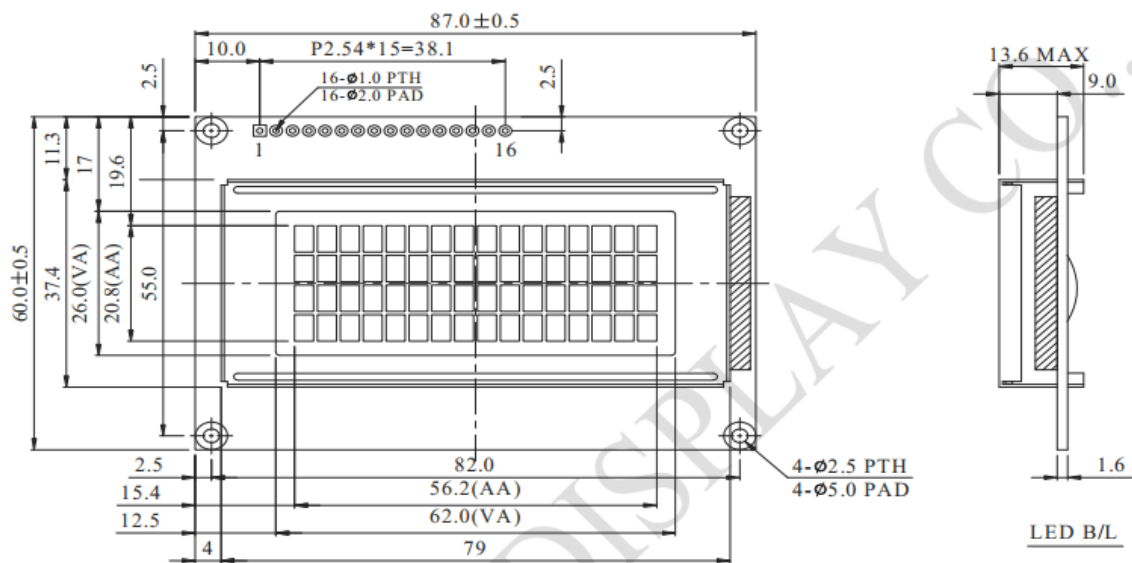


Ilustración 19 Dimensiones de Pantalla LCD 16x4.

Para conocer las dimensiones en milímetros del Teclado matricial, ver ilustración 20,

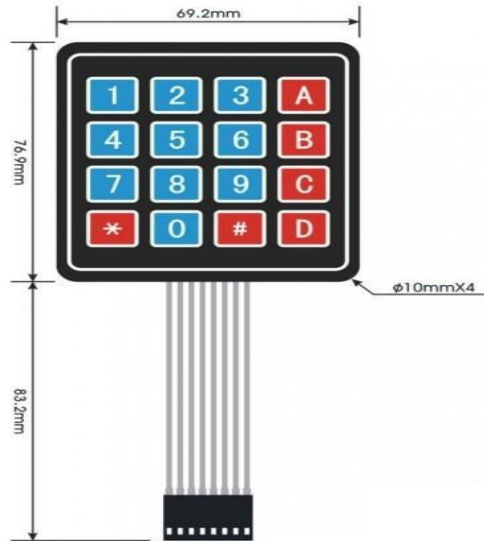


Ilustración 20 Dimensiones de teclado matricial.

Las dimensiones en milímetros de la Placa Arduino, se presentan en la ilustración 21.

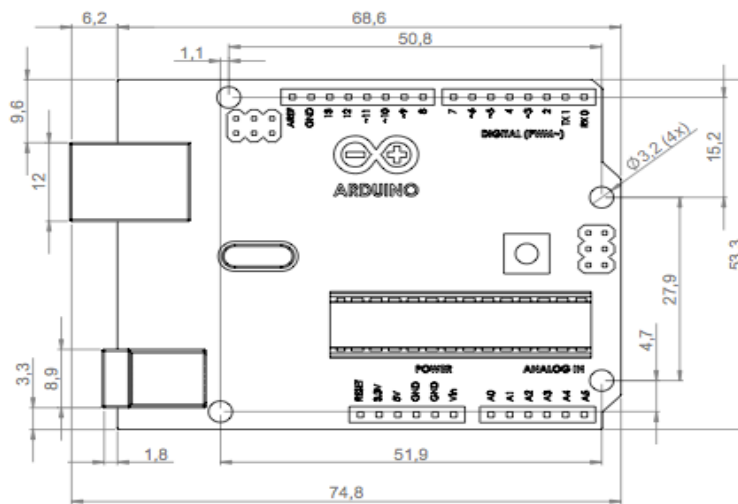


Ilustración 21 Dimensiones de placa Arduino.

Las dimensiones del módulo MAX6675 se presentan en la ilustración 22.

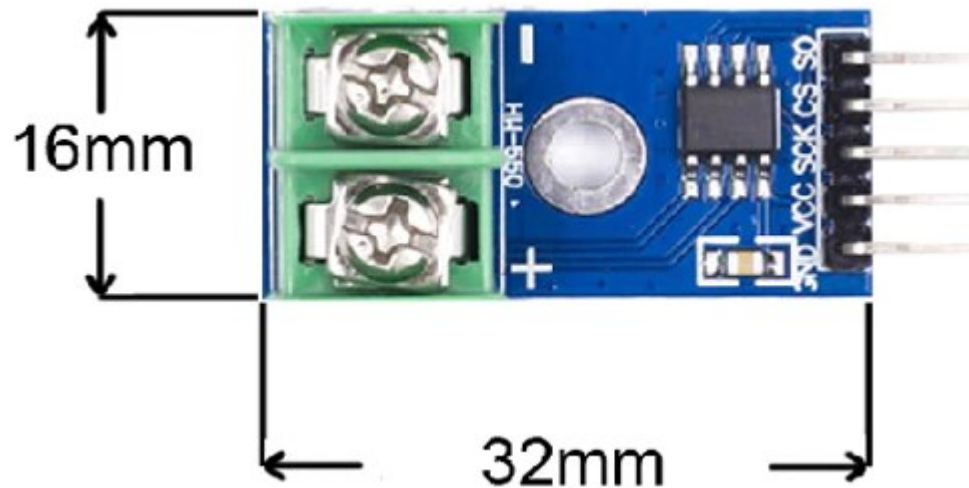


Ilustración 22 Dimensiones de módulo MAX6675.

2.2.3. Planos de diseño.

Considerando las dimensiones de cada módulo que conforma el dispositivo, así como las dimensiones de la cámara del horno, se procede con el diseño del soporte y el case que albergará los componentes electrónicos.

Para el case, se consideraron como criterios de diseño principales las dimensiones especificadas en centímetros y la disposición de la pantalla, el teclado y el módulo Max6675. Asimismo, se tomó en cuenta la ubicación en altura de los puertos USB para el Arduino y las salidas de los cables del termopar. Posteriormente, se definieron las dimensiones de ancho, largo y altura del case, junto con su respectivo espesor. Además, se evaluó el diseño de la tapa del case,

asegurando mantener el mismo espesor que el cuerpo del case y dejando el espacio adecuado para mostrar la pantalla LCD 16X4 y el teclado matricial, así como se muestra en las ilustraciones 23 y 24.

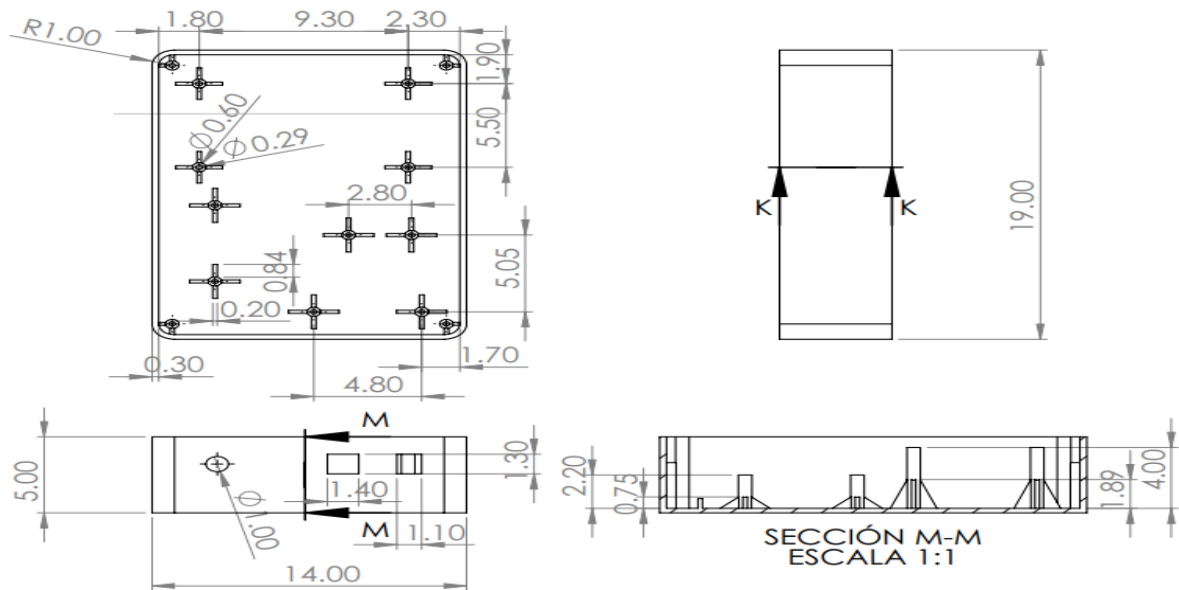


Ilustración 23 Dimensiones de case.

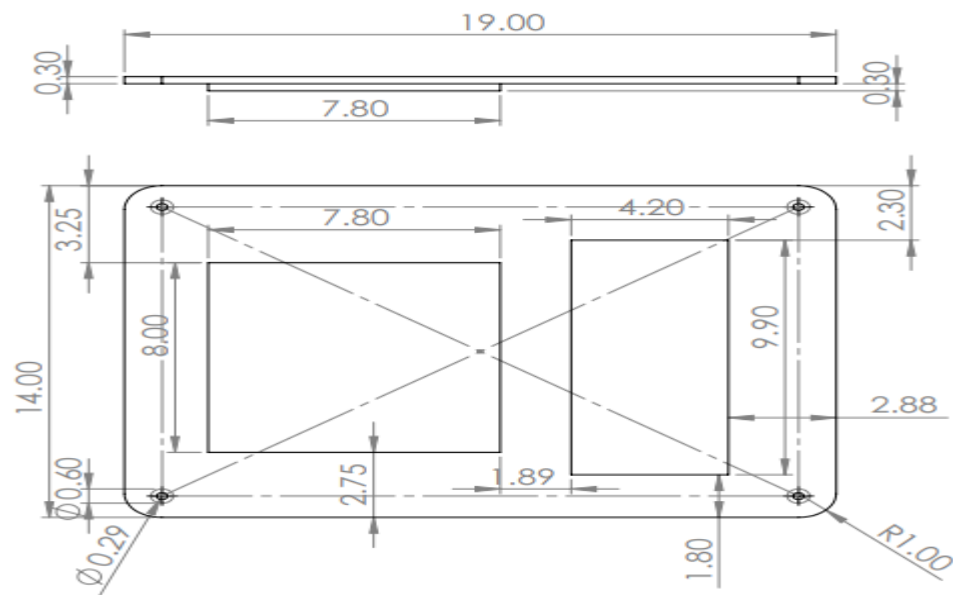


Ilustración 24 Dimensiones de tapa del case.

Para el soporte, se consideraron varios criterios de diseño. En primer lugar, se definieron los centímetros como la unidad de medida y también se tuvo en cuenta la altura desde la base de la cámara del horno hasta el visor de la compuerta, tomando esto como referencia para la ubicación de las probetas como lo muestra en la ilustración 25. De esta manera, se aseguraría la introducción del termopar para medir la temperatura entre dichas probetas. El soporte está diseñado con dos patas, las cuales tienen forma circular para garantizar su estabilidad, evitando así que entren en contacto con las protuberancias de la bandeja de la cámara del horno.

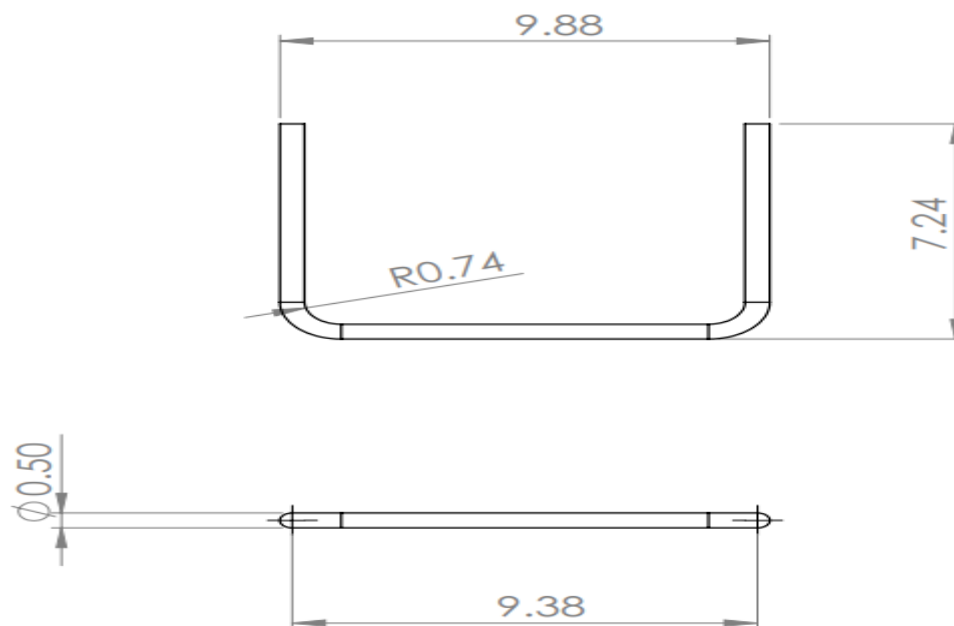


Ilustración 25 Dimensiones de una de las patas del soporte.

Además, se realizaron dos dobleces a los costados y uno en el fondo del soporte, así como muestra la ilustración 26. Estas pestañas cumplen la función de evitar que las probetas se caigan de la bandeja. Un costado del soporte no tiene

pestaña ya que será éste el lado frontal a través del cual se colocarán las probetas. Este diseño también tiene un impacto en el calentamiento de las probetas, ya que el calor no se dirige directamente hacia ellas, sino hacia las pestañas del soporte. Esto asegura que el calor proporcionado no incide directamente en las probetas, sino que se distribuye de manera uniforme.

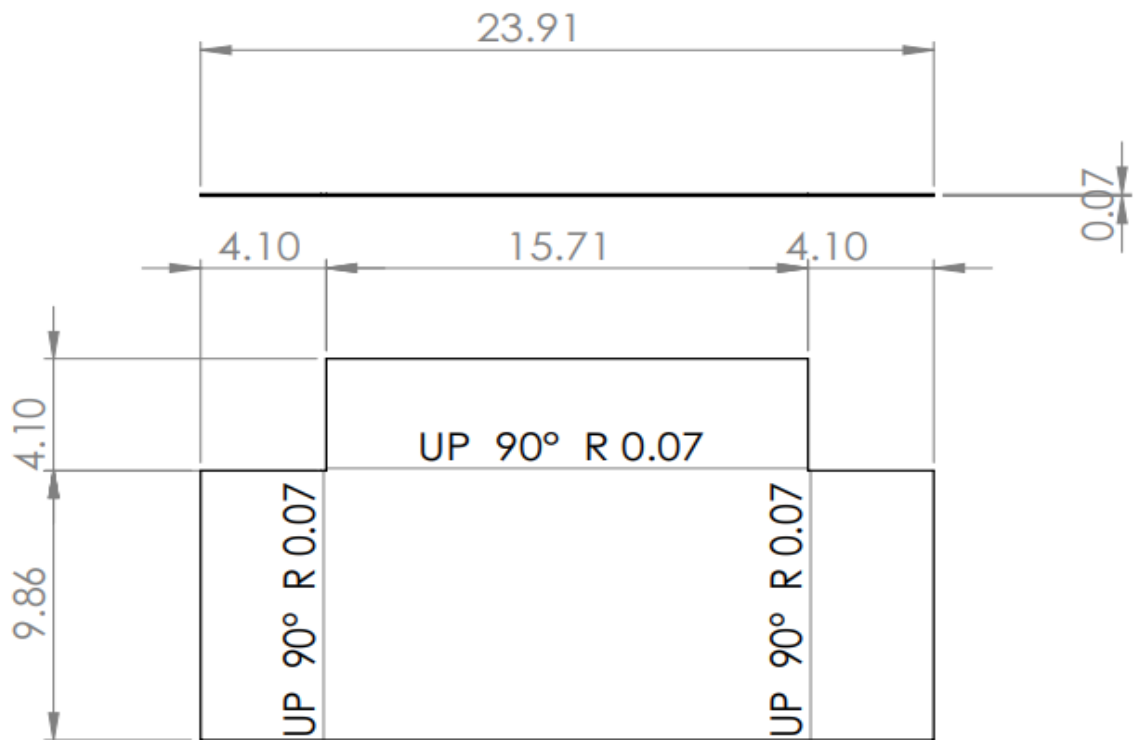


Ilustración 26 Chapa metálica del soporte.

2.2.4. Selección de los tipos de materiales a utilizar.

2.2.4.1. Selección de material del case.

Se consideraron varios criterios de diseño, incluyendo su funcionalidad, su uso y el ambiente al que estará expuesto.

En cuanto a la funcionalidad, el case debe ser capaz de mostrar información a través de la pantalla y permitir el ingreso de datos mediante el teclado matricial que lo compone.

Respecto a su uso, este se llevará a cabo específicamente en el Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Dado que el dispositivo estará sujeto a movimientos y manipulaciones durante su uso en dicho entorno, se requiere que el case sea resistente y durable.

En cuanto al ambiente al que será sometido, se prevé que estará expuesto a la temperatura ambiente del Laboratorio de Tratamientos Térmicos, que no alcanzará extremos como los del horno para evitar deformaciones en el material del case.

La ilustración 27, proporciona una serie de materiales candidatos para la construcción del case.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)	Tenaz y duradero, resistente a impactos y al calor. Necesita una plataforma caliente para imprimirse Necesita ventilación	Prototipos funcionales
PLA (ácido poliláctico)	Los materiales de modelado por deposición fundida más fáciles de imprimir, son rígidos, fuertes pero frágiles, menos resistentes al calor y a los productos químicos biodegradables	Modelos conceptuales y prototipos estéticos
PETG (tereftalato de polietileno glicolizado)	Compatible con temperaturas de impresión más bajas para una producción más rápida, son resistentes a la humedad y a los productos químicos, tienen alta transparencia y pueden ser apto para la alimentación	Aplicaciones impermeables Componentes de fijación mediante presilla
Nylon	Resistente, duradero y ligero, son duros y parcialmente flexible también resistente al calor y a los impactos, pero son muy difícil de imprimir con el FDM	Prototipos funcionales Piezas resistentes al desgaste
TPU (Poliuretano termoplástico)	Flexible y estirable, también resistente a impactos, tienen excelente amortiguación de vibraciones	Prototipos flexibles

Ilustración 27 Materiales para impresión 3D.

2.2.4.2. Selección de materiales para soporte metálico.

Los criterios de diseño para la selección de materiales del soporte se centraron en la resistencia a altas temperaturas, asegurando que el material no se deforme ni experimente cambios en sus propiedades.

La resistencia a la alta temperatura implica que el material debe poder soportar temperaturas superiores a 900 °C durante períodos prolongados.

Además, es crucial que el material no experimente cambios significativos en sus propiedades después de múltiples usos.

Con estos criterios establecidos, como se ha explicado en el capítulo de metodología, el primer paso fue seleccionar una temperatura de referencia de 900°C. Luego se procedió a seleccionar el material, de una lista amplia de diversos tipos, como cerámicos, aceros aleados y aceros para trabajos en caliente.

Entre los materiales cerámicos se tienen:

- I. **Óxidos de aluminio (Al₂O₃):** La alúmina es uno de los materiales cerámicos más utilizados debido a su alta resistencia mecánica, estabilidad térmica y resistencia a la corrosión. Es comúnmente utilizado en aplicaciones de alta temperatura como revestimientos de horno, aisladores eléctricos y componentes de maquinaria.

- II. **Carburo de silicio (SiC):** El carburo de silicio es conocido por su excelente resistencia a altas temperaturas, corrosión y abrasión. Se utiliza ampliamente en aplicaciones de alta temperatura como hornos industriales, intercambiadores de calor y componentes de motores de alta eficiencia.

En cuanto a los Aceros aleados, se tienen:

- I. **Aceros al cromo-molibdeno (Cr-Mo):** Estos aceros contienen cromo y molibdeno como principales elementos de aleación, lo que les confiere una excelente resistencia a la oxidación y la corrosión a altas temperaturas. Son ampliamente utilizados en la industria petroquímica, plantas de energía y aplicaciones de fabricación de calderas y recipientes a presión.
- II. **Aceros al cromo-níquel (Cr-Ni):** Estos aceros contienen cromo, níquel y a veces otros elementos de aleación como el titanio y el aluminio. Ofrecen una buena resistencia a la corrosión y la oxidación a altas temperaturas, así como una excelente resistencia mecánica. Son comúnmente utilizados en la industria aeroespacial, automotriz y de generación de energía.

En relación a los Aceros para trabajos en caliente, se tienen:

- I. **Aceros al cromo:** Los aceros al cromo son una categoría de aceros que contienen una cantidad significativa de cromo como elemento de aleación principal. Estos aceros pueden soportar temperaturas de hasta 600-700 °C y son comúnmente utilizados en aplicaciones de trabajo en caliente

como herramientas de corte, matrices y troqueles para forja y estampado en caliente.

- II. Aceros al cromo-molibdeno:** Los aceros al cromo-molibdeno contienen cromo y molibdeno como principales elementos de aleación. Estos aceros tienen una mayor resistencia a la fluencia y a la deformación a altas temperaturas y son capaces de soportar temperaturas de hasta 700-800 °C. Son utilizados en aplicaciones de trabajo en caliente como componentes de turbinas de vapor, calderas y sistemas de generación de energía.
- III. Aceros al cromo-níquel:** Los aceros al cromo-níquel contienen cromo, níquel y a veces otros elementos de aleación como el titanio y el vanadio. Estos aceros tienen una excelente resistencia a la oxidación y la corrosión a altas temperaturas y pueden soportar temperaturas de hasta 800-900 °C. Son utilizados en aplicaciones de trabajo en caliente como intercambiadores de calor, hornos industriales y equipos de procesamiento químico.

La elección definitiva estuvo condicionada por la disponibilidad de dichos materiales en el país, además de consideraciones económicas y la capacidad para soportar temperaturas elevadas, así como la estabilidad dimensional en condiciones altas temperaturas y resistencia a la corrosión.

2.3. Diseño de código de programación.

2.3.1. Diseño y elaboración de código de programación.

2.3.1.1. Prueba de caja negra.

De acuerdo con las necesidades del presente proyecto de investigación, se tomó como consideración la entrada de datos y salida de datos en la cuales se tienen, temperatura y tiempo. Y como resultados, se desea conocer la temperatura de termocupla, el tiempo para alcanzar dicha temperatura y el tiempo que durará el calentamiento hasta la temperatura seleccionada.

A continuación, en la ilustración 28, se muestra por el método de caja negra la entrada y salida de datos.



Ilustración 28 Caja negra para la elaboración de código de dispositivo.

2.3.1.2. Flujograma.

Una vez estudiados la entrada y salida de datos, se procedió a describir la estructura lógica del código que permitirá controlar la temperatura y el tiempo del dispositivo utilizando un Arduino junto con sus respectivos módulos: MAX6675, Pantalla LCD16x4 y teclado matricial 4x4. Es importante destacar que estos módulos ya cuentan con algoritmos que serán integrados en la estructura de código del presente proyecto de investigación.

El diagrama de flujo presentado en la ilustración 29, ilustra el funcionamiento completo del programa, desde el inicio hasta el final.

En la pantalla inicial, se muestran los mensajes de bienvenida junto con el nombre de la universidad y la pertenencia a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, específicamente a la Escuela de Ingeniería Mecánica. Posteriormente, se muestra un mensaje sobre la velocidad de calentamiento.

Luego de este mensaje, aparecen los botones de inicio y apagado, indicando el inicio de la prueba y la opción de finalizar el programa, respectivamente.

Al seleccionar "iniciar", el programa solicita al usuario ingresar el material, la temperatura y el tiempo de mantenimiento de esa temperatura. Una vez ingresados estos datos, se puede iniciar la prueba con el botón que indica la tecla siguiente.

Posteriormente, estos parámetros son procesados a través del código, estableciendo la comunicación entre los diferentes módulos del Arduino, incluyendo el termopar, el teclado y la pantalla.

Una vez recopilados todos los parámetros necesarios, se muestra una nueva pantalla con información relevante, como la temperatura actual del termopar, el tiempo total transcurrido desde el inicio de la prueba y el tiempo que las probetas han estado a la temperatura establecida en los parámetros anteriores.

Por último, se presentan los botones de pausa y detener. Al pausar la prueba, se detiene el tiempo de mantenimiento de la probeta, mientras que al presionar "detener", el programa regresa a la pantalla de inicio y se reinicia el código nuevamente.

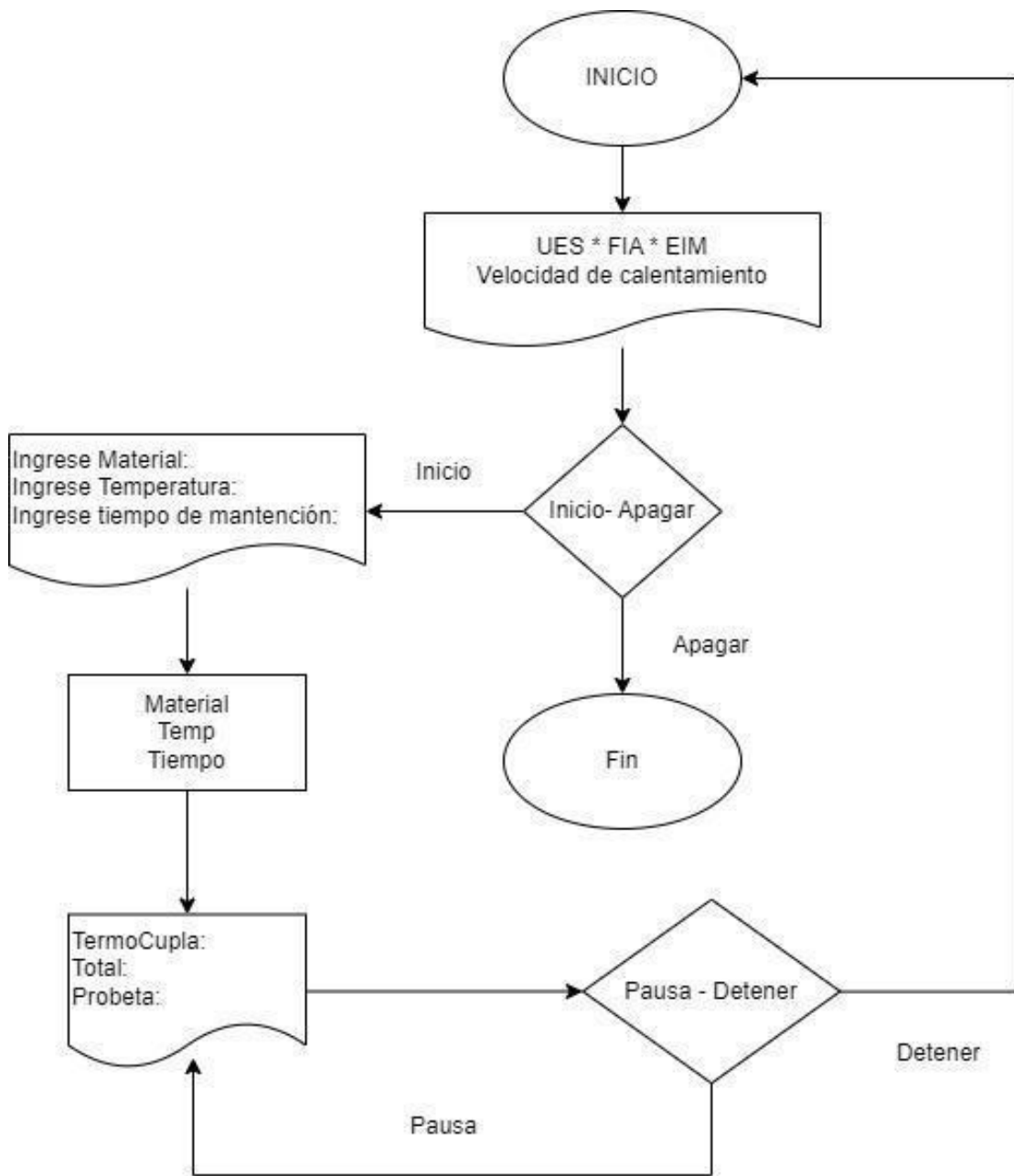


Ilustración 29 Flujograma de funcionamiento de dispositivo.

2.4. Pruebas de dispositivo.

Posterior a la fabricación del dispositivo se llevaron a cabo las pruebas de funcionamiento, para lo cual se programaron visitas al Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador. La prueba consistió en registrar los cambios de temperatura medidos por el termopar del horno y por el termopar del dispositivo en relación con el tiempo.

Para efectos de registro se ha generado el formato presentado en la ilustración 30, en el cual se llevará el monitoreo en paralelo de la temperatura percibida por el termopar del horno y la percibida por el termopar del dispositivo.

La prueba se realizó en 2 partes, en la primera, el horno se calentó hasta 500 °C y posteriormente se mantuvo 5 minutos a dicha temperatura, mientras que, en la segunda prueba, se mantuvo el horno con la temperatura de la primera prueba y se elevó hasta 900 °C, en esta última teniendo un tiempo de mantención de 10 minutos.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Formato de registro de temperatura de horno y dispositivo vs tiempo.

Temperatura de seteo (°C):

Tiempo de mantención (min):

Tiempo (min)	Temperatura horno (°C)	Temperatura dispositivo (°C)
0		
5		
10		
15		
20		
25		
n		

Ilustración 30 Formato de registro de temperatura de horno y dispositivo vs tiempo.

Se obtuvieron los valores promedio de la velocidad de calentamiento para ambas pruebas de acuerdo con la ecuación 8. Posteriormente se procedió a graficar las curvas de calentamiento correspondiente a cada prueba, con lo que se puede

visualizar el comportamiento de ambas mediciones sobre el mismo plano, tanto para la primera prueba como para la segunda. Además, se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos como comprobación de diferencias en cuanto a los valores observados.

CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL DISPOSITIVO.

3.1. Flujograma de diseño del dispositivo.

Se ha diseñado un diagrama de flujo (ver ilustración 31), que explica el proceso de diseño en varias etapas.

En la primera parte, se identificaron las variables de diseño relevantes. Luego, se procedió al desarrollo del proceso de diseño, comenzando con el diseño conceptual que abarca la configuración del dispositivo en dos módulos: el primero, encargado de la funcionalidad principal, y el segundo, el soporte.

A continuación, se proporciona una explicación detallada de los componentes que conforman el primer módulo, el cual se encarga de ejecutar las funciones necesarias. Estos componentes incluyen el Arduino, el módulo MAX6675, el teclado matricial y la pantalla LCD 16x4.

Finalmente, se lleva a cabo la selección de materiales y elementos electrónicos adecuados para el diseño, asegurando así la integridad y eficacia del dispositivo.

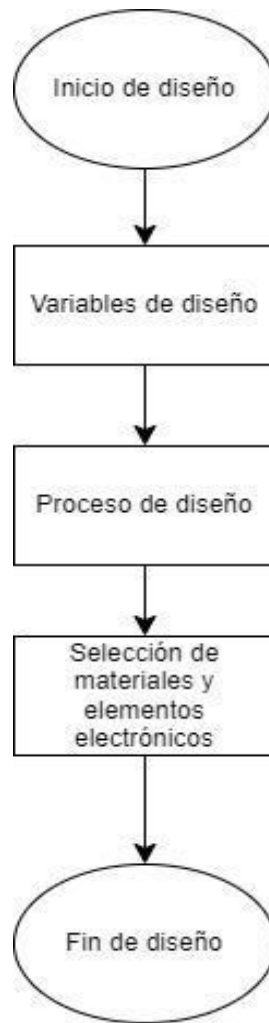


Ilustración 31 Flujograma de diseño de dispositivo.

3.2. Variables de diseño.

Las siguientes variables de diseño se han seleccionado de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes de aceros relativos a la aplicación de tratamientos térmicos y de los parámetros que se necesitan controlar para poder obtener una temperatura de austenización correcta, por ello, a continuación, se mencionan las variables utilizadas para el diseño.

1. Tipo de material.

2. Temperatura de austenización.
3. Tiempo.
4. Tiempo de austenización.
5. Tiempo de mantención.
6. Porcentaje de carbono.
7. Espesor de probeta.
8. Geometría de la probeta.

I. Variable de control y variables dependientes:

- 1. Temperatura de austenización:** Esta variable representa la temperatura de austenización correspondiente a cada acero, la cual depende de su porcentaje de carbono. Su medición será en grados Celsius.
- 2. Tiempo:** Permite cuantificar el tiempo de calentamiento del horno, en este caso particular las mediciones se harán en minutos y horas.
- 3. Tiempo de austenización:** Indica la duración necesaria para que la probeta alcance la temperatura de austenización, la cual se determina a partir de ecuaciones que consideran el diámetro y el espesor de la probeta.
- 4. Tiempo de mantención:** Se refiere al período durante el cual la probeta debe mantenerse a temperatura constante para lograr una austenización completa en toda su masa.

5. **Porcentaje de carbono:** Permite establecer la temperatura de austenización junto con el tipo de tratamiento a aplicar y de ese modo elegir el material adecuado para el soporte interno que sostendrá las probetas de prueba, el cual deberá ser capaz de sostenerlas y además de permanecer el tiempo que se requiera sin sufrir deformaciones o una falla destructiva en su geometría.

II. Variables independientes:

Las características dimensionales de la probeta determinan dos cosas respecto a la construcción del soporte, una es el tiempo que deberá permanecer en el interior de la cámara y la otra es el tamaño mínimo que debe tener para poder alojar a las probetas.

6. **Espesor de probeta:** Cuantifica el espesor de la probeta y dependiendo de éste, así será el tiempo de mantención en el horno, las mediciones se realizan en milímetros.
7. **Geometría de probeta:** Cuantifica el diámetro de cada probeta para definir el tiempo de calentamiento para así poder llegar a la temperatura de austenización, las mediciones se realizan en milímetros.
8. **Material:** Almacena el número AISI del material sobre el cual se realiza la prueba

3.3. Proceso de diseño

Diseño conceptual

La construcción del dispositivo se basa en la necesidad de monitorear la relación entre el tiempo y la temperatura a la que una probeta metálica permanece en el interior del horno de tratamiento térmico, con el fin de controlar con mayor certeza las propiedades mecánicas que han de obtenerse posterior al proceso de tratamiento térmico.

Debido a que la temperatura máxima de austenización a la que se programa el horno es medida y registrada a través de una termocupla ubicada en el fondo de la cámara de calentamiento, esencialmente no se está registrando la temperatura en el lugar donde justamente se ubican las probetas que serán tratadas, de modo que existe una variación entre la temperatura que registra el sensor del horno y la temperatura real a la que se encuentran las muestras metálicas durante el proceso de calentamiento.

A través de la construcción del dispositivo se busca determinar esa diferencia de temperatura que permita tomar una mejor decisión respecto al tiempo que se debe mantener las muestras en el horno, y de esa manera predecir las propiedades de dureza y resistencia que se presentarán después del tratamiento térmico.

La idea general del dispositivo consiste en 2 módulos.

- I. **Primer módulo (case):** consiste en un termopar que medirá la temperatura en la región interna del horno, específicamente cerca de las probetas. Este termopar enviará su señal al panel principal, donde será convertida en datos digitales a través del módulo MAX6675. Este último está conectado al Arduino, el cual facilita la presentación de los datos mediante una pantalla, mostrando así el valor de temperatura de esa zona.

Termopar: se encarga de captar la información necesaria y debe poder operar en condiciones muy especiales, ya que la punta estará expuesta a temperaturas mayores que 900 °C durante el tratamiento térmico de la probeta, que puede durar de 2 a 3 horas.

- II. **Segundo módulo (soporte metálico):** consiste en un soporte metálico diseñado para ser instalado en el interior de la cámara del horno, donde se colocará la probeta sujeta a estudio. Estos dos componentes están separados, pero forman parte integral del dispositivo necesario para llevar a cabo el proyecto.

Soporte metálico: su función principal es sostener la probeta de prueba cerca del termopar para permitir la medición precisa de la temperatura. La selección del material para el soporte es crítica y depende de factores como soportar la temperatura y mantener estabilidad dimensional a altas

temperaturas, que determinan la exposición del soporte en términos de temperatura y tiempo. Es esencial que el material elegido tenga una alta resistencia al calor para evitar deformaciones o pérdida de rigidez en condiciones de altas temperaturas, conservando así sus propiedades mecánicas.

Dado que la temperatura objetivo del horno será de 900 °C, el acero seleccionado debe mantener sus propiedades mecánicas a esa temperatura.

En la ilustración 32 se presenta la subdivisión de los elementos de los cuales estará formado el dispositivo.






ELEMENTO	IMAGEN
Arduino UNO R3	
Módulo Max 667	
Termopar tipo K	
Display LCD 16x4	
Cables DuPont jumper	

Ilustración 32 Elementos electrónicos.

Planificación y organización

Tomando en cuenta la función principal que deberá cumplir cada módulo, se realizó una evaluación de las diferentes partes que deben componerlo para cumplir dicha función

I. Panel principal

La función principal de este módulo consiste en conocer la temperatura de la probeta en cada momento cuando se encuentre en las diferentes etapas del calentamiento. Para tener acceso a esa información en primer lugar se necesita tener acceso a la cavidad del horno y poder percibir su temperatura; de modo que una termocupla es la herramienta indicada para llevar a cabo esta tarea. Tomando en cuenta que un termopar recibe una cantidad de calor y la transforma en un voltaje, se necesita un componente o conjunto de componentes que permitan traducir este valor de modo que pueda convertirse en una serie de datos que puedan mostrarse en una pantalla.

La placa Arduino UNO R3 es una placa de desarrollo de hardware de código abierto que utiliza un microcontrolador ATmega328P. Es ampliamente utilizada en proyectos de electrónica y robótica debido a su versatilidad y facilidad de uso.

La placa consta de los siguientes elementos:

- I. Microcontrolador:** utiliza un microcontrolador ATmega328P de la compañía Atmel.
- II. CPU:** el ATmega328P tiene una arquitectura basada en RISC (Reduced Instruction Set Computing) con una velocidad de reloj de 16 MHz.

- III. **Memoria:** la placa Arduino UNO R3 tiene 32 KB de memoria flash para almacenar el código del programa, 2 KB de SRAM para datos y 1 KB de EEPROM para almacenar datos de manera no volátil.
- IV. **Puertos de E/S:** cuenta con 14 pines de E/S digitales, de los cuales 6 pueden utilizarse como salidas PWM, y 6 entradas analógicas.
- V. **Alimentación:** se puede alimentar a través de un cable USB (5V) o mediante un adaptador de corriente (7-12V). También puede ser alimentado con una batería externa.
- VI. **Conexiones:** posee un puerto USB, un conector de alimentación, conectores para programación (ISP) y un conector ICSP (In-Circuit Serial Programming).
- VII. **Interfaces de comunicación:** dispone de una interfaz UART para comunicación serial, así como interfaces I2C y SPI .
- VIII. **Compatibilidad:** es compatible con una amplia gama de shields (placas de expansión) que permiten agregar funcionalidades específicas a la placa base.

3.4. Selección de materiales y elementos electrónicos

3.4.1. Material para el case

Argumento.

El case debe contener a los elementos electrónicos de forma distribuida y en posición que no afecte la conexión de los mismos, para ello se tomó en cuenta las dimensiones de cada uno para poder distribuirlos adecuadamente dentro del case y del mismo modo diseñar donde serían fijados, se consideró fijarlos mediante soportes verticales donde el dispositivo pueda ser atornillado. En la distribución de los elementos se consideran las conexiones internas y externas para considerar los orificios que debe llevar el gabinete.

Selección.

Con estos criterios establecidos, se optó por realizar una inspección 3D del case y su tapa, utilizando material PLA, ya que es el más comercializado en el país y tiene un fácil acceso, se realizará con un entramado fino y una disposición sólida. Esto contribuirá a hacer que las paredes del case sean estables y que los soportes de los tornillos mantienen su rigidez

3.4.2. Material para el soporte.

Argumento.

Para poder realizar pruebas a probetas de ensayo de acero, se necesita un acero que soporte temperaturas en un rango de 900 °C a 1200°C y que a la vez permita la mantención de dicha temperatura para controlar propiedades.

Selección de material.

De acuerdo con (Avner, 1988), la presencia de cromo y níquel como elementos de aleación del acero nos genera las siguientes propiedades.

- I. **Cromo (Cr):** Mejora la resistencia a la corrosión y a la oxidación, lo que lleva a la formación de aceros inoxidable.
- II. **Níquel (Ni):** Aumenta la resistencia a la corrosión y mejora la tenacidad y la resistencia a altas temperaturas.

Teniendo en cuenta estos dos elementos aleantes, así como la condición de ser un acero austenítico y lo expuesto en el apartado de metodología, se eligió el acero inoxidable 304. Esta elección se debe a que cumple con las necesidades específicas del proyecto y también por consideraciones económicas y de accesibilidad a nuestras condiciones. El acero inoxidable 304 es un material que contiene cromo-níquel, lo que le confiere una alta resistencia a la oxidación y a las temperaturas elevadas.

Análisis de Fuerzas

El análisis de fuerzas se realizó considerando la fuerza ejercida por el peso del material de la placa más el peso de 2 probetas. Conociendo el diámetro, altura (ver ilustración 33), y la densidad de las probetas, se obtiene la masa multiplicando la densidad por el volumen:

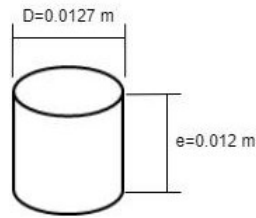


Ilustración 33 Dimensiones de probeta.

Considerando:

$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ Densidad del acero AISI 304

$D = \frac{1}{2}'' = 1.27 \text{ cm} = 0.0127 \text{ m}$ Diámetro de probeta

$e = 0.012 \text{ m}$ espesor o altura de probeta

$$m_p = \rho \cdot V = \rho \left(\frac{\pi}{4} \right) (D^2) (e) = (7850) \left(\frac{\pi}{4} \right) (0.0127^2) (0.012)$$

$$m_p = 0.0119 \text{ kg}$$

Por lo tanto, la fuerza debido al peso de una probeta se obtiene como sigue:

$$F_p = m_p \cdot g = (0.0119) (9081)$$

$$F_p = 0.1167 \text{ N}$$

Tomando como base que el esfuerzo de un material es la multiplicación de del módulo de elasticidad del material por su deformación dividido entre la longitud material; igualando la suma de deformaciones al valor de esfuerzo de fluencia del acero AISI 304 a condiciones de temperatura de 900°C , para obtener el espesor de lámina requerido para soportar 2 probetas de acero AISI 1045.

Por la ley de Hooke con temperatura de operación de un horno de tratamientos térmicos y tiempos de mantención de 60 minutos a 3 horas, según (Committee,

1990), se tiene lo siguiente y también sustituyendo ecuación de deformación unitaria se obtiene

$$\sigma_{y(900^{\circ}\text{C})} = E_{900^{\circ}\text{C}} * \frac{\delta_T}{L}$$

Ecuación 9 ley de Hooke y deformación unitaria.

Despejando deformación total:

$$\delta_T = \sigma_{y(900^{\circ}\text{C})} * \frac{L}{E_{900^{\circ}\text{C}}}$$

Sustituyendo en ecuación de deformación total.

$$\sigma_{y(900^{\circ}\text{C})} * \frac{L}{E_{900^{\circ}\text{C}}} = +\delta_F$$

Calculando deformación debido a las fuerzas de peso de probetas y peso de material de soporte:

$$\delta_F = \frac{FL^3}{(48)EI}$$

Ecuación 10 Deformación en una viga simplemente apoyada y con carga al centro.

Definiendo fuerza F como:

$$F = 2F_P$$

Ecuación 11 Fuerza de probetas y del material de soporte metálico.

Que corresponde al peso de 2 probetas, Por lo tanto, en la ecuación de deformación:

$$\delta_F = \frac{[2F_P]L^3}{48EI}$$

El momento de inercia se obtiene con la vista frontal de la placa de acero sobre la que actúan las fuerzas:

Siendo x el espesor de la lámina y L el largo, tal como se especifica en la ilustración 34.

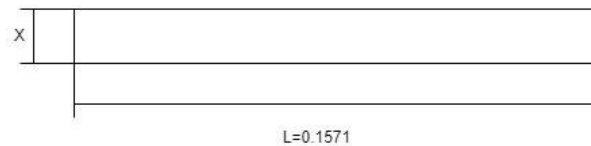


Ilustración 34 Perfil de lámina para soporte.

$$I = \frac{1}{12}Lx^3$$

$$\delta_F = \frac{[2F_P]L^3}{48E\left(\frac{1}{12}\right)(L)(x^3)}$$

$$\delta_F = \frac{[(2)(0.1167)](0.1571)^3}{(48)193 * 10^9 \left(\frac{1}{12}\right)(0.1571)(x^3)}$$

$$\delta_F = \frac{0.0009}{121.2812 * 10^9 x^3}$$

Sustituyendo valores en la ecuación de esfuerzos:

$$\sigma_{y(900^\circ\text{C})} * \frac{L}{E_{900^\circ\text{C}}} = \frac{[2F_P]L^2}{4E(x^3)}$$

Ecuación 12 Esfuerzo de fluencia en función de la deformación por fuerza y temperatura del soporte.

Sustituyendo

$$20 * 10^6 * \frac{0.1571}{130 * 10^9} = \frac{0.0009}{121.2812 * 10^9 x^3}$$
$$2931273.311 * x^3 = 0.0009$$

Ordenando:

$$x = \sqrt[3]{\frac{0.0009}{2931273.311}}$$

Resolviendo para x se tiene:

$$x_1 = -0.000337312 - 0.000584242i$$

$$x_2 = -0.000337312 + 0.000584242i$$

$$x_3 = 0.000674624 \text{ m} \approx 0.67 \text{ mm}$$

Deformación unitaria.

$$\epsilon = \frac{\delta_F}{L} = \frac{0.0009}{0.1571} = \frac{121.2812 * 10^9 * 0.000674624^3}{0.1571} = \frac{24169277.17 * 10^{-12}}{0.1571} = 1.54 * 10^{-4}$$

A continuación, en la ilustración 35, se presenta una simulación en SolidWorks que muestra un análisis estático por carga y temperatura donde se observa que la deformación unitaria está en el rango de análisis permisible, por lo cual la selección de espesor de lámina es satisfactoria.

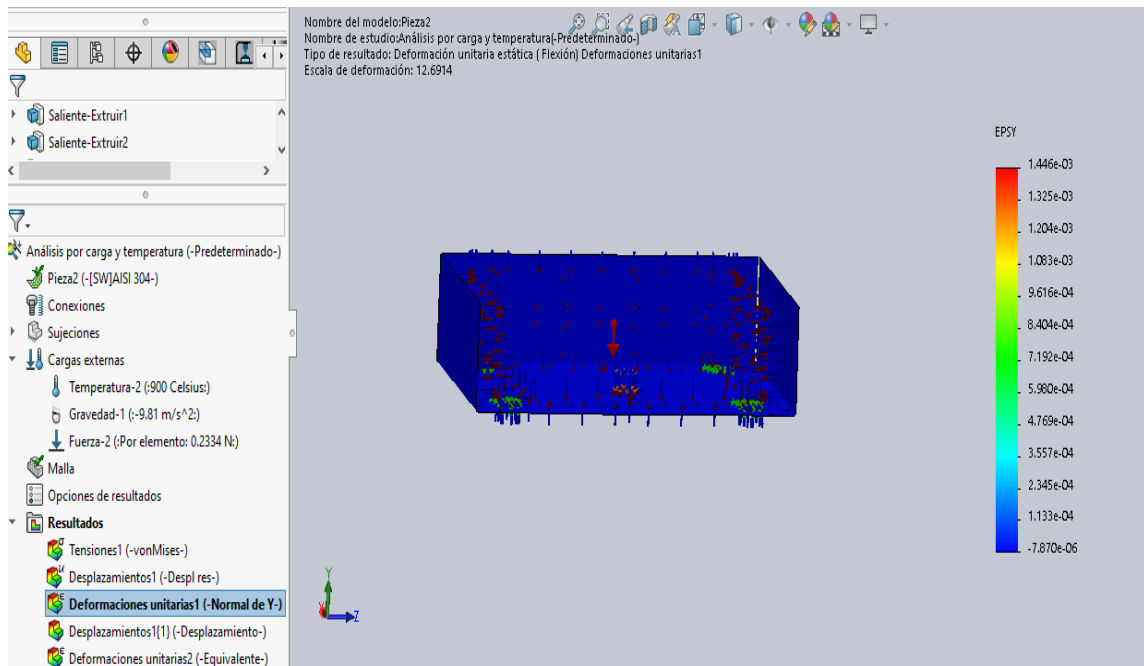


Ilustración 35 Análisis de carga estática por fuerza y temperatura.

Con lo cual, se obtiene que una lámina de 0.67 mm de espesor es capaz de sostener el peso de 2 probetas en esas condiciones de temperatura.

Debido a la disponibilidad en el mercado se ha seleccionado una lámina de 0.7 mm de espesor el cual es suficiente para realizar las pruebas con 2 probetas de acero AISI 1045.

Para la realización de análisis de fuerzas, se ha planteado la superficie de soporte como una viga con dos apoyos y una carga concentrada en el centro correspondiente al peso de 2 probetas.

Se realizó el cálculo de las reacciones en los apoyos A y B, ilustración 36 para determinar el esfuerzo de deflexión al cual estará sometido.

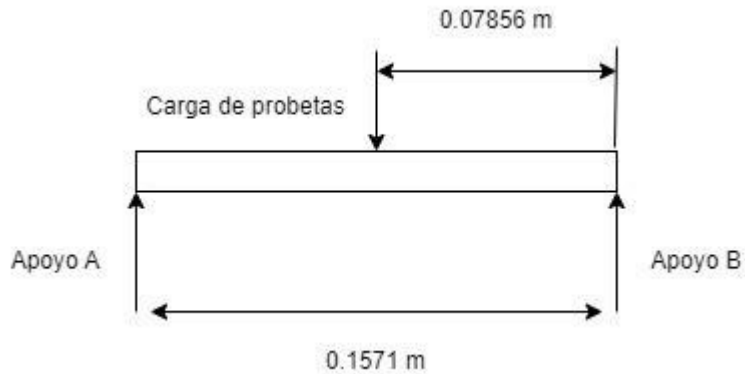


Ilustración 36 Fuerzas sobre placa horizontal del soporte.

Se realizó la sumatoria de momentos con respecto al punto A, ver diagrama de cuerpo libre en la ilustración 37.

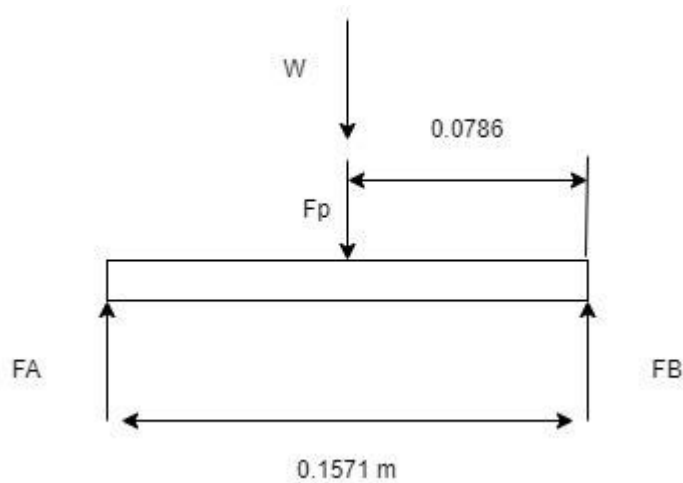


Ilustración 37 Diagrama de cuerpo libre.

$$\sum M_A = 0$$

$$\sum M_A = (2F_p + W)(0.07856) - F_B(0.1571) = 0$$

Donde F_p es la fuerza debida al peso de las probetas, F_A y F_B son las reacciones en los apoyos y W es el peso del porta probetas.

Volviendo a la sumatoria de momentos:

$$2F_P(0.0786)+W(0.0786)-F_B(0.1581)=0$$
$$2*(0.1167)(0.0786)+(1.5049)(0.0786)-F_B(0.1581)=0$$

$$F_B = \frac{2*(0.1167)(0.0786)+(1.5049)(0.0786)}{(0.1581)}$$

$$F_B = 0.8642 \text{ N}$$

Para el cálculo de la reacción en A se hace sumatoria de fuerzas en el eje y

$$\uparrow \sum F_y = 0$$

$$F_A - F_P - W + F_B = 0$$

$$F_A - 0.1167 - 1.5049 + 0.8642 = 0$$

$$F_A = 0.1167 + 1.5049 - 0.8642$$

$$F_A = 0.8015 \text{ N}$$

Cálculo de diámetro de varilla de acero AISI 304 para soporte.

El cálculo de diámetro de varilla se hará usando la reacción de mayor valor obtenida para el cálculo del espesor de la lámina, posteriormente se calcularon los momentos de flectores producidas por el peso de las probetas y del material de soporte. Por último, se realizó un análisis de deformaciones que permitirá dimensionar el diámetro de las varillas (Ver ilustración 38) para el planteamiento de fuerzas y momentos en las patas del soporte.

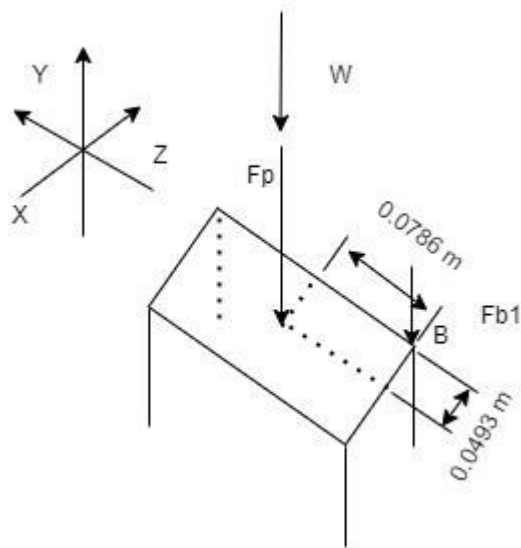


Ilustración 38 Representación 3D de soporte y fuerzas.

Como datos calculados previamente se tienen.

$$F_p = 2(0.1167)W = 1.5049 \text{ N}$$

Primero se calcularon los momentos en los ejes x y z.

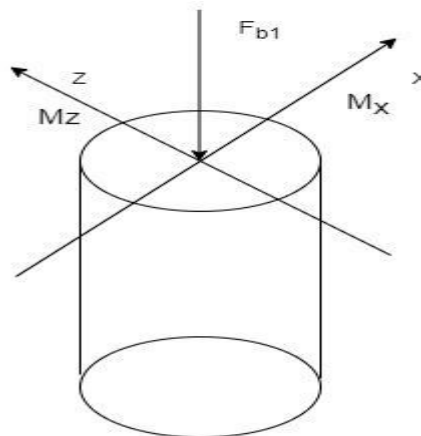


Ilustración 39 Sumatoria de momentos sobre pata de soporte.

$$\sum M_z = (2F_p + W)(0.0493)$$

$$M_z = (2(0.1167) + 1.5049)(0.0493)$$

$$M_z = 0.0857 \text{ Nm}$$

$$\sum M_x = (2F_p + W)(0.0786)$$

$$M_x = (2(0.1167) + 1.5049)(0.0786)$$

$$M_x = 0.1366 \text{ Nm}$$

Resultante del momento flector:

$$M_R = \sqrt{M_x^2 + M_z^2}$$

$$M_R = \sqrt{0.0857^2 + 0.1357^2}$$

$$M_R = 0.1613 \text{ Nm}$$

Las reacciones han sido calculadas anteriormente, de las cuales se escoge la mayor para el diseño y se divide entre 2, ya que son dos patas.

$$F_{b1} = \frac{F_b}{2}$$

$$F_{b1} = \frac{0.8642}{2} = 0.4321 \text{ N}$$

Calculando deformación total

$$\delta_T = \delta_{Temp} - \delta_{flector} - \delta_{axial}$$

$$\delta_T = \alpha(T_f - T_i)L - \frac{32M_R L}{E\pi D^4} - \frac{4F_{b1}L}{E\pi D^2}$$

Se tiene:

$$\delta_T = \sigma_y * \frac{L}{E}$$

$$\sigma_y * \frac{L}{E_{304}} = \alpha(T_f - T_i)L - \frac{32M_R L}{E_{304}\pi D^4} - \frac{4F_{b1}L}{E_{304}\pi D^2}$$

$$\sigma_Y = \alpha(T_f - T_i)E_{304} - \frac{32M_R}{\pi D^4} - \frac{4F_{b1}}{\pi D^2}$$

Ecuación 13 Límite de fluencia en función de deformación por momento flector y carga axial.

Para el esfuerzo último a la compresión (UCS) (σ_y) del acero AISI 304 se tiene 505 MPa. y un módulo de elasticidad de 193 GPa

Donde:

$T_f = 900$ °C, $T_i = 38$ °C, $L = 0.0724$ m (Definida por dimensiones de horno), $M_R = 0.1613$ Nm, $F_{b1} = 0.4321$ N, $E_{304} = 193 \times 10^9$ Pa, $\sigma_y = 505 \times 10^6$ Pa, $\alpha = 16.6 \times 10^{-6}$ °C

Sustituyendo:

$$505(10^6) = 16.6(10^{-6})(900 - 38)(193)(10^9) - \frac{32(0.1613)}{\pi D^4} - \frac{4(0.4321)}{\pi D^2}$$

Despejando para D, se tiene.

$$D_1 = 0.0052 \text{ m} \approx 5.2 \text{ mm}$$

$$D_2 = -0.0052 \text{ m}$$

$$D_3 = 0.0052i$$

$$D_4 = -0.0052i$$

Por los resultados obtenidos se puede seleccionar una varilla de acero AISI 304 con un diámetro mínimo de 5.2 mm. Debido a la disponibilidad del mercado en El Salvador, se seleccionó una varilla de 7 mm de diámetro.

3.4.3. Magnitud física objetivo.

Definición.

Se conoce como magnitud física objetivo a la variable que se pretende monitorear, es decir, la temperatura de la probeta colocada en el horno, según el acero seleccionado se espera un rango de temperatura igual a 900 a 1100 grados Celsius.

3.4.4. Dispositivos sensor.

Argumento.

Para la interpretación y lectura de la temperatura, el dispositivo en construcción debe contar con elemento capaz de proveer un estímulo de su entorno y traducir esa información que recibe. Dicho elemento debe ser un sensor de temperatura, el cual permite medir la temperatura mediante una señal eléctrica determinada y responder ante esta acción, que posteriormente debe ser interpretada mediante un circuito electrónico.

Selección.

Se seleccionó un elemento transductor capaz de transformar la energía térmica en energía cinética y de amplio rango de medición llamado Termopar tipo K (Cromel/Alumel), extraído de la ilustración 14 del capítulo 1.8.2.2.

Este elemento determina la temperatura midiendo la pequeña fuerza electromotriz que origina la unión de dos metales conductores a distintas temperaturas; el llamado efecto termoeléctrico o efecto Seebeck el cual se

destaca por su uso genérico, robusto, de bajo costo y por su popularidad se encuentra disponible en las sondas más diversas. Las temperaturas cubiertas por este tipo de sensor oscilan entre -200°C y 1200°C .

3.4.5. Lectura e interpretación.

Argumento.

La eficacia del sistema de medida de temperatura basado en termopar se ve respaldada por su precisión la cual es de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ o 4% de temperatura medida y confiabilidad. No obstante, su implementación efectiva requiere abordar tres consideraciones fundamentales.

- I. Capacidad de gestionar tensiones muy bajas (del orden de μV) o amplificar la respuesta del termopar para que un microcontrolador pueda trabajar con ella.
- II. Corrección de la medida de la sonda para equipararse a una distribución lineal (linealización de la respuesta del termopar).
- III. Compensación de unión fría para corregir la dependencia que existe entre la temperatura medida por la sonda y la temperatura ambiente.

Selección.

Se necesita resolver las consideraciones antes mencionadas para lograr un adecuado funcionamiento e interpretación del termopar, para ello se selecciona un circuito integrado llamado: MAX6675, que resuelve de manera sencilla los tres

aspectos en cuestión, gracias en gran medida a que utiliza un bus SPI, usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados, muy fácil de explotar en una aplicación basada en microcontrolador, además de separar el punto de medida y el de procesado de los datos de forma más cómoda que la alternativa que supone extender el cable de la sonda.

3.4.6. Circuito integrado receptor de la información.

Argumento.

A continuación, se requiere de un elemento electrónico capaz de recibir la señal desde el módulo de transferencia de información y mostrarla en pantalla, es decir, que pueda ejecutar un conjunto de órdenes grabadas en memoria

Selección.

El microcontrolador puede llevar a cabo las funciones que requerimos en nuestro sistema de lectura e interpretación, ya que puede controlar elementos de entrada y salida mediante un procesador y una memoria que puede ejecutar acciones programadas.

Se seleccionó la placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega328P: Arduino UNO R3. Esta placa permite programar el microcontrolador y así llevar a cabo las operaciones requeridas, su interfaz de entrada permite conectar diferentes tipos de periféricos que trasladan información al microcontrolador, que posteriormente se encargará de procesar gracias a su interfaz de salida donde hace conexión con otros periféricos.

3.4.7. Visualización.

Argumento.

Para visualizar las variables que se monitorean en el sistema, se requiere de un elemento capaz de recibir la información del microcontrolador y mostrarla en pantalla.

Selección.

Se selecciona un elemento display LCD 16x4 alfanumérico, puede mostrar cualquier texto o variable.

CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE.

4.1. Proceso de construcción.

Para la construcción del dispositivo se contó con los elementos electrónicos seleccionados previamente, los cuales al ser debidamente conectados cumplen con la finalidad de monitorear la temperatura de las probetas dentro del horno de tratamientos térmicos. Es necesario e importante que los elementos estén protegidos en un case para su uso práctico y transportación del dispositivo.

4.1.1. Construcción de case.

A partir de las medidas de los elementos que componen el dispositivo se diseñó el case en el software de diseño, SolidWorks, con el propósito de proteger los componentes ante la manipulación de los mismos y además de protegerlos ante agentes externos tales como polvo, humedad, etcétera. (ver ilustraciones 40 y 41)

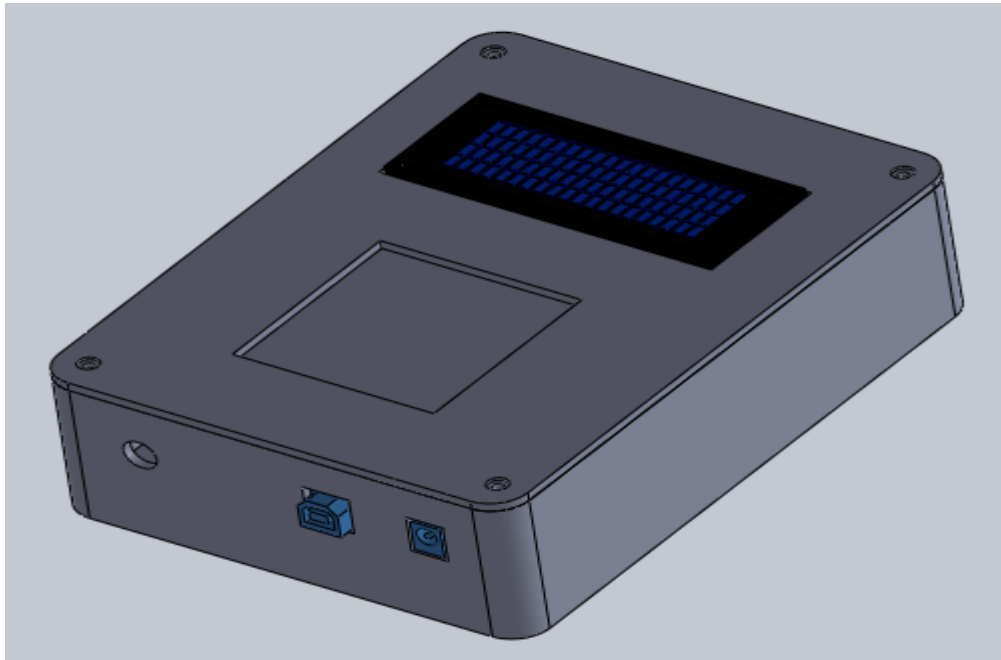


Ilustración 40 Case con tapa.

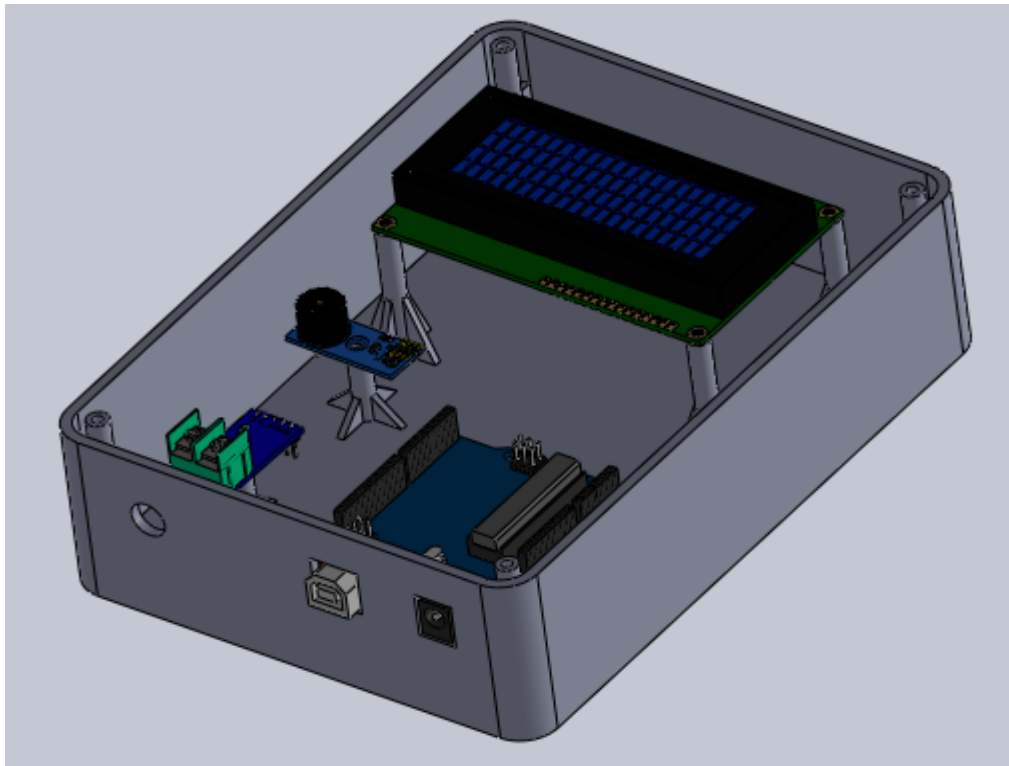


Ilustración 41 Case con elementos electrónicos.

4.1.1.1. Fabricación

Una vez considerados los criterios se procedió a la fabricación del gabinete. Debido a que el dispositivo cuenta con elementos específicos su fabricación debe ser personalizada, por tanto, se decide utilizar tecnología de impresión 3D para su construcción, dicha tecnología permite diseñar con precisión el case de tal forma que los elementos queden debidamente fijados y en posición estratégica.

4.1.1.2. Montaje de elementos en el gabinete.

Luego de la fabricación del case se procedió al montaje y conexión de los elementos, teniendo como elemento central el circuito integrado microcontrolador tipo Arduino Uno R3, a esta placa se conectaron todos los dispositivos mediante cables de conexión especiales para componentes electrónicos.

4.1.2. Elementos y su conexión.

4.1.2.1. Termopar.

Este elemento se conectó al módulo MAX6675 mediante su polaridad positiva y negativa identificado en cada elemento como se muestra en la ilustración 42.



Ilustración 42 Conexión de módulo MAX6675 a termopar tipo K.

4.1.2.2. Transmisor MAX6675 para termocupla tipo K.

Este convertidor analógico a digital se conectó a la placa del microcontrolador tal y como se muestra en la ilustración 43.

Placa Arduino	MAX6675	Descripción
GND	GND	Conexión a tierra de la placa, el negativo.
5V	Vcc	Por este pin se suministra 5v.
D13	SCK	Serial Clock. Este pin es utilizado por el maestro para generar los pulsos (la señal de reloj) que sincronizan la comunicación (de ahí que sea un protocolo síncrono).
D10	C5	Pin digital. Soporta la comunicación SPI.
D12	SO	Pin digital. Soporta la comunicación SPI.

Ilustración 43 Conexiones del módulo MAX6675.

4.1.2.3. Pantalla LCD 16x4.

Este display alfanumérico básico de 16 caracteres por 4 líneas (ver ilustración 44), fue conectado a la placa del microcontrolador de acuerdo con la ilustración 45.

Placa Arduino	Pantalla LCD 16x4	Descripción
GND	GND	Conexión a tierra de la placa, el negativo.
5V	Vcc	Por este pin se suministra 5v.
A4	SDA	Entrada y salida digital.
A5	SCL	Entrada y salida digital.

Ilustración 44 Conexiones de display LCD 16x4.

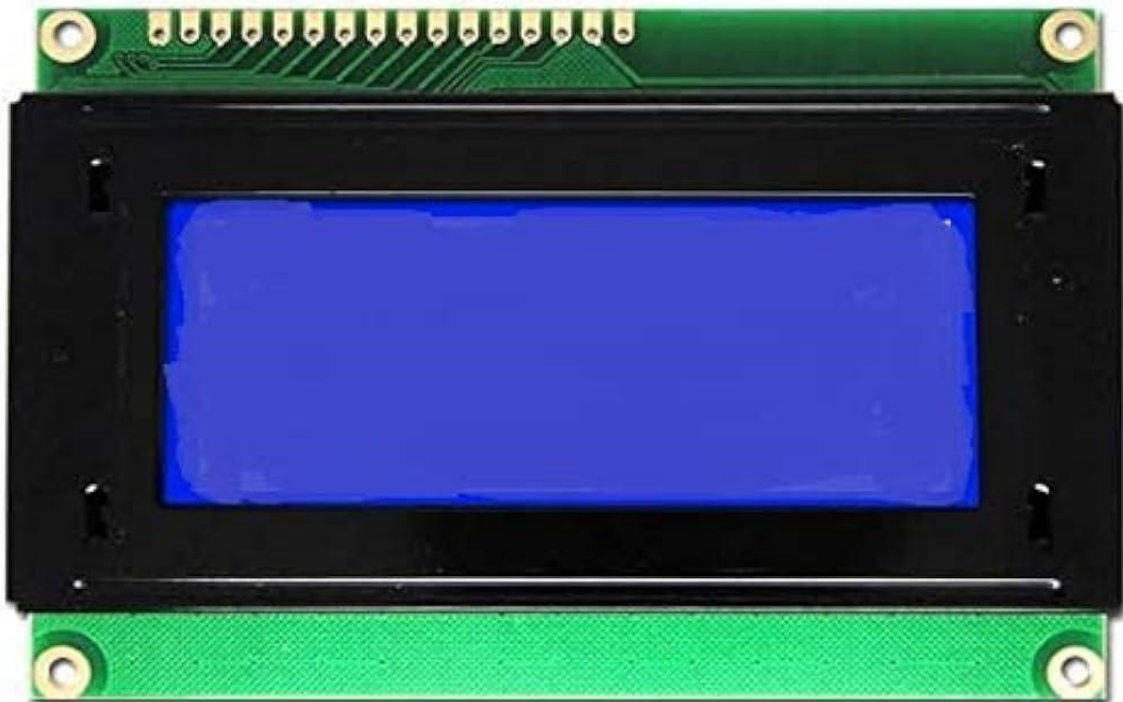


Ilustración 45 Módulo de display LCD 16x4.

4.1.2.4. Teclado matricial.

El esquema de conexión de un teclado matricial es sencillo, todos los pines fueron conectados a entradas digitales tal como se muestra en la ilustración 46.

La ilustración 47 representa el teclado matricial 4x4 y su conexión a la placa Arduino.

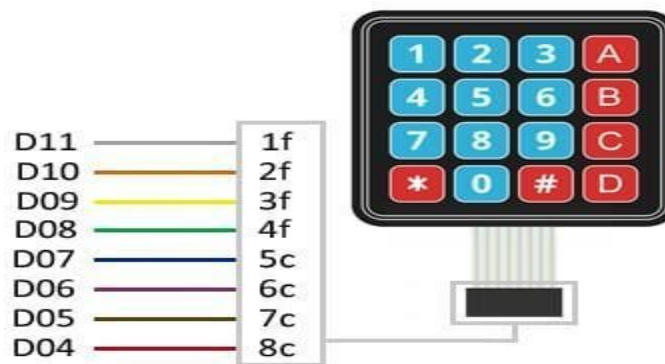


Ilustración 46 Teclado matricial 4x4.

Placa Arduino	Teclado alfanumérico	Descripción
D11	1f	Entrada/salida digital
D10	2f	Entrada/salida digital
D09	3f	Entrada/salida digital
D08	4f	Entrada/salida digital
D07	5c	Entrada/salida digital
D06	6c	Entrada/salida digital
D05	7c	Entrada/salida digital
D04	8c	Entrada/salida digital

Ilustración 47 Conexiones de teclado matricial.

4.1.2.5. Diagrama de conexión de los elementos eléctricos.

El esquema de conexión de los componentes electrónicos mencionados en los apartados anteriores, ver ilustración 48.

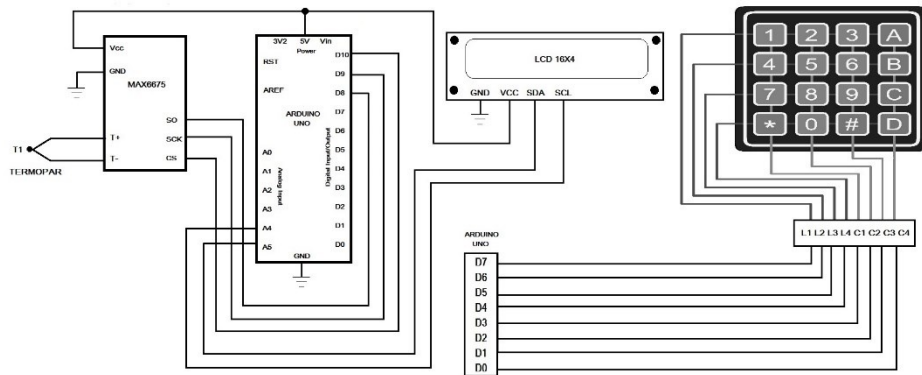


Ilustración 48 Esquema de conexión de los elementos electrónicos.

4.1.3. Fabricación de soporte.

Con base en los criterios establecidos en el capítulo de metodología, se procedió a fabricar el soporte. Este proceso inició con el diseño en el software de diseño SolidWorks utilizando chapa metálica, ver ilustración 49, lo que permitió determinar el tamaño adecuado para la chapa y facilitó el proceso de plegado. Además, se consideró utilizar un perfil circular para las patas del soporte, las cuales fueron fabricadas de acuerdo con esta especificación. (ver ilustración 50)

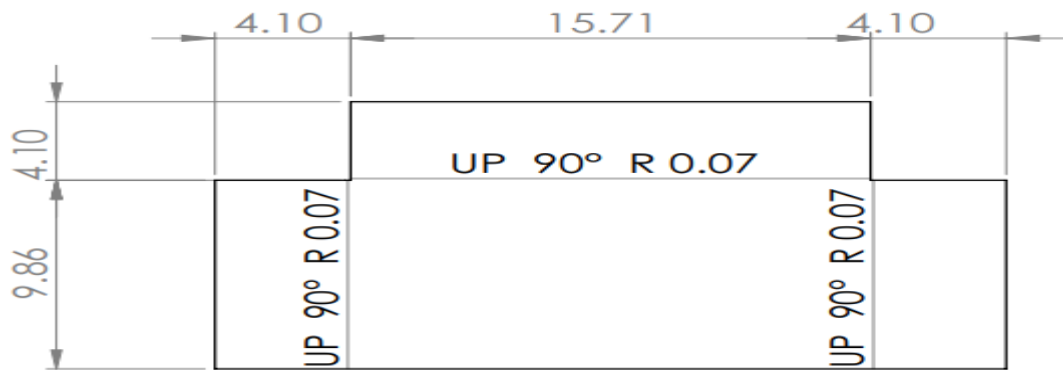


Ilustración 49 Dimensiones de chapa metálica.

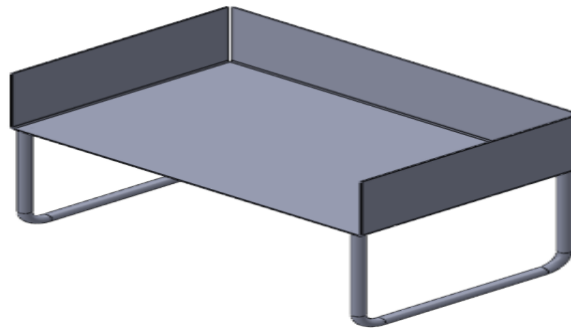


Ilustración 50 Soporte diseñado en SolidWorks.

Tras definir los criterios para la selección de materiales en la metodología y posteriormente en el capítulo de construcción, se procedió a fabricar el soporte utilizando acero inoxidable AISI 304 y soldadura MIG en las pestañas plegadas y en la unión de la chapa con las patas. (ver ilustración 51)



Ilustración 51 Soporte construido con acero AISI 304.

CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Pruebas de funcionamiento de pantallas del dispositivo

Las pruebas de funcionamiento del dispositivo se realizaron en el horno del Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, obteniendo los siguientes resultados:

- I. Pantalla de inicio, la cual presenta el encabezado de la escuela, velocidad de calentamiento e indicadores de Inicio -Apagar, como se muestra en la ilustración 52.



Ilustración 52 Pantalla de inicio.

- II. Pantalla en la que se recopila la información del material, de acuerdo con la ilustración 53, muestra la temperatura de austenización o mantención y tiempo de mantención, además presenta la opción de “Iniciar”; el cual permite iniciar la prueba y opción “Siguiente”; el cual permite desplazarse entre líneas para llenar los parámetros necesarios.

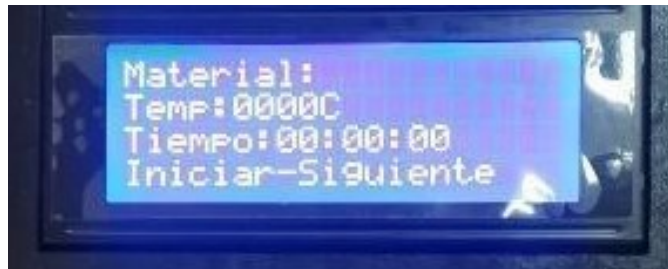


Ilustración 53 Pantalla de recopilación de información.

- III. Pantalla de inicio de prueba, ilustración 54, esta muestra la temperatura que está censando la termocupla dentro del horno, Total; que indica el tiempo desde que se inicia la prueba hasta su finalización, probeta; aquí se muestra el tiempo de mantención una vez llegado a la temperatura indicada en la pantalla anterior, Pausa; permite pausar la prueba congelando los tiempos al igual que el indicador de Detener.

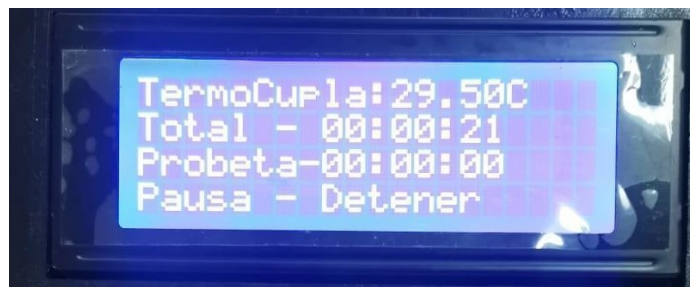


Ilustración 54 Pantalla de inicio de prueba.

5.2. Presentación y análisis de resultados

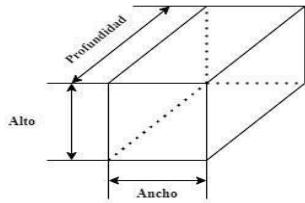
Para obtener los resultados esperados, mediante visitas al Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, se obtuvo como primer resultado, la caracterización del horno, la curva característica de calentamiento del horno de tratamientos térmicos.

Para dicha prueba se realizó la visita al laboratorio el día 15 de noviembre de 2022, se logró caracterizar el horno con sus medidas eléctricas y sus dimensiones ilustración 55, para la toma de las mediciones correspondientes, la toma de temperatura del horno se realizó en intervalos de 2 minutos utilizando la termocupla interna del horno, teniendo como temperatura objetivo 900 °C. Los datos obtenidos se presentan en la ilustración 56, obteniendo como resultado la siguiente tabla de datos y curva de calentamiento del horno.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Formato de registro de dimensiones y caracterización del horno de
tratamientos térmicos**



Alto [m]	0.1444
Ancho [m]	0.229
Profundidad [m]	0.350
Voltaje [v]	220
Amperios [a]	14.4
Potencia [kW]	5.5
Temperatura máxima [°C]	1100

Ilustración 55 Dimensiones y caracterización del horno de tratamientos térmicos.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Registro de temperatura y tiempo del horno.

Temperatura de seteo (°C): 900

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	38
2	47
4	81
6	132
8	185
10	234
12	279
14	320
16	357
18	392
20	424
22	455
24	484
26	511
28	537
30	563
32	587
34	612
36	635
38	658

40	680
42	701
44	722
46	743
48	763
50	782
52	800
54	818
56	836
58	853
60	870
62	886
64	902

Ilustración 56 Registro de temperaturas vs tiempo.

Con los datos registrados se obtiene la siguiente tendencia presentada en el gráfico 1. En el cual se observa un crecimiento gradual de la temperatura que, de acuerdo con la ecuación 9, corresponde a un valor promedio de 13.5 grados Celsius por cada minuto transcurrido.

$$\text{Velocidad de calentamiento} = \frac{902-38}{64} = 13.5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

Ecuación 14 Velocidad de calentamiento de horno.

Curva característica del horno de tratamientos térmicos

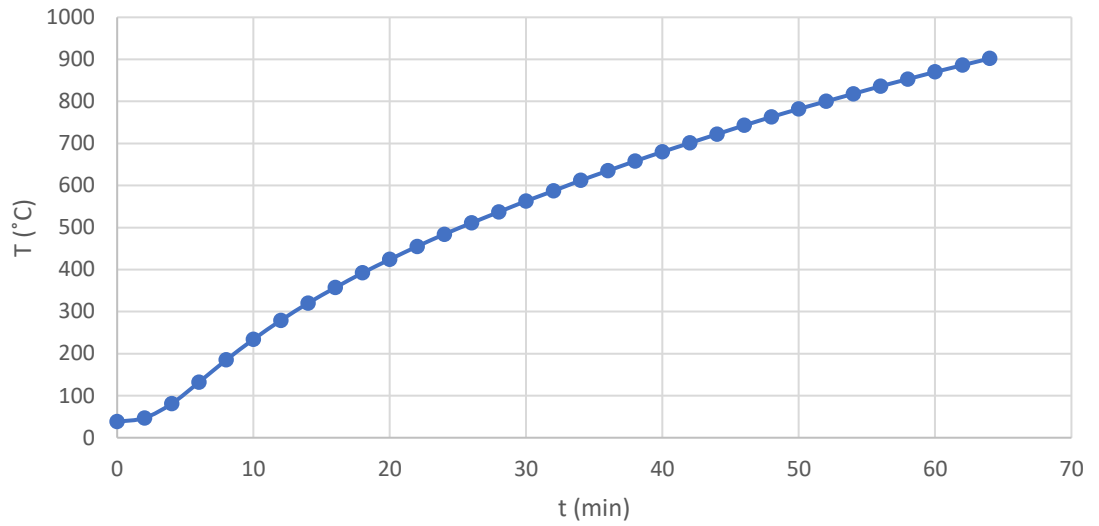


Gráfico 1 Curva de calentamiento.

5.2.1. Curva de calentamiento termocupla interna vs. Termocupla de dispositivo.

Para la prueba del dispositivo en el horno se hizo una visita al Laboratorio de Tratamientos Térmicos, el día 14 de diciembre del 2023, realizándose dos pruebas de calentamiento.

En la primera prueba, se calentó el horno a 500 °C y posteriormente se mantuvo durante 5 minutos a dicha temperatura. En la segunda prueba se mantendrá el horno con la temperatura de la primera prueba y se elevó hasta 900 °C, manteniendo a esta última temperatura, un tiempo de 10 minutos. Los resultados se muestran en la ilustración 57.

- Primera prueba:


 UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA Registro de datos termopar interno vs. termopar de dispositivo Prueba N°: <u>1</u>		
Temperatura de seteo (°C): 500		
Tiempo de mantención (min): 5		
Tiempo (min)	Temperatura horno (°C)	Temperatura de dispositivo (°C)
0	21	28.5
5	66	96.65
10	182	148.75
15	294	225.5
20	385	297.25
25	462	371.25
30	534	442.5
35	596	510.25
40	607	526.5
45	609	528.25

Ilustración 57 Registro de datos temperatura interna vs termopar de dispositivo.

Teniendo en cuenta los datos registrados y utilizando la ecuación 8 se obtuvieron los siguientes valores para la velocidad de calentamiento percibida por la termocupla del horno y por la termocupla del dispositivo:

$$\text{Velocidad de calentamiento termocupla de horno} = \frac{609-21}{45} = 13.0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

$$\text{Velocidad de calentamiento termocupla dispositivo} = \frac{528-28.5}{45} = 11.1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

Con base en estos resultados, se interpreta que la termocupla externa percibe una menor velocidad de calentamiento promedio.

Cabe recalcar que hay discrepancia en las dos mediciones debido a la división de escala de cada termocupla, de modo que la medición tiende a ser más precisa en cuanto al valor registrado por la termocupla externa que brinda datos hasta el orden de las centésimas de grado Celsius.

En primera instancia esto implica una mayor sensibilidad ante cualquier cambio de la temperatura y es por eso que desde el minuto 0 puede observarse una diferencia de 7.5 °C entre termocuplas.

En el transcurso de la prueba, se nota que esa diferencia sigue existiendo tal como se muestra en el gráfico 2, no solamente por lo mencionado anteriormente sino por la diferencia de posición entre los termopares, tomando en cuenta que el dispositivo está midiendo la temperatura en el área más cercana a donde estarán ubicadas las probetas, notar que al cabo de 45 min esta diferencia se ha convertido en 80.75 °C. Respecto al dato anterior podemos concluir que al cabo de 45 min, una probeta ubicada en la zona de medición de la termocupla externa

se encontrará cerca de 80 °C más fría de lo que muestra el indicador de temperatura del horno.

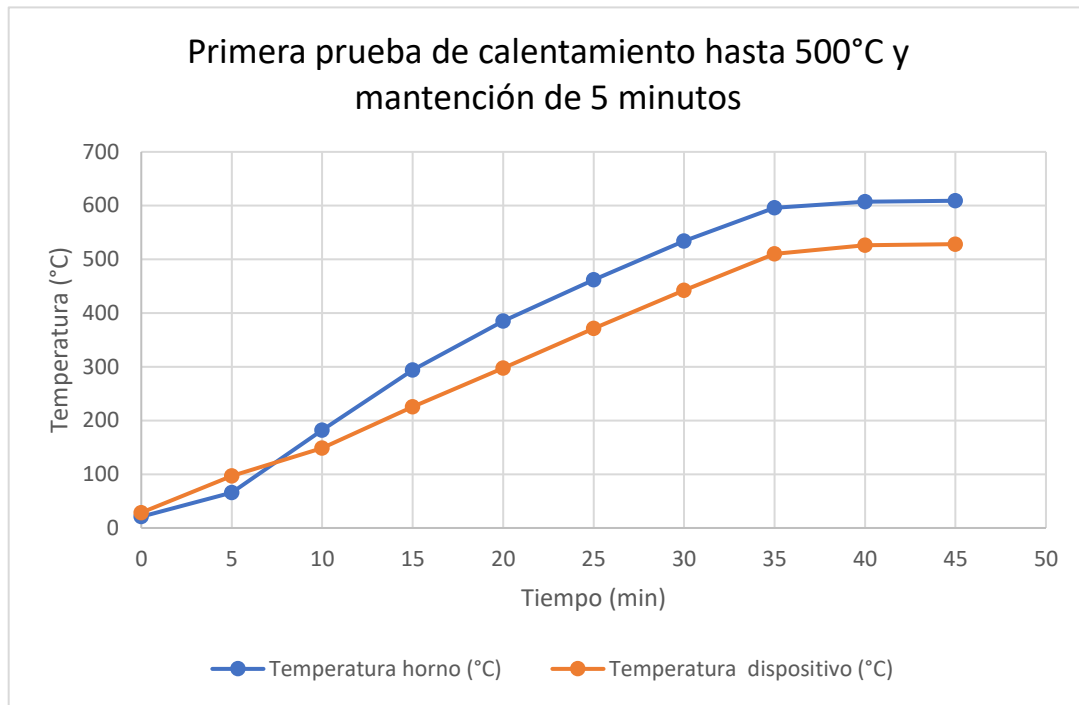


Gráfico 2 Prueba 1 calentamiento y mantención.

-
- Segunda prueba

La segunda prueba se realizó cuando el horno ya había iniciado su proceso de calentamiento, pasados los 5 minutos de mantención se dio inicio la segunda prueba (ver ilustración 58), por lo tanto, los valores en el tiempo cero para este caso tienen una mayor variación. En el gráfico 3 se observa la tendencia de las curvas y puede notarse que, salvo algunos puntos, las curvas tienen una alineación casi paralela entre sí hasta llegar al valor de temperatura objetivo.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Registro de datos termopar interno vs. termopar de dispositivo
Prueba N°: 2**

Temperatura de seteo (°C): 900

Tiempo de mantención (min): 10

Tiempo (min)	Temperatura horno (°C)	Temperatura de dispositivo (°C)
0	597	524.00
5	671	599.75
10	750	675.25
15	794	722.00
20	842	773.00
25	884	817.00
30	926	860.25
35	965	901.00
40	991	917.00
45	975	918.00
50	983	922.50
55	977	919.30
60	976	920.50

Ilustración 58 Registro de datos de termopar interno vs. Termopar de dispositivo.

Para esta prueba, las velocidades de calentamiento para ambas termocupas se han calculado de acuerdo con la ecuación 8 como sigue:

$$\text{Velocidad de calentamiento termocupla de horno} = \frac{976-597}{60} = 6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

$$\text{Velocidad de calentamiento termocupla dispositivo} = \frac{920.5-524.00}{60} = 6.6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

De acuerdo con los resultados, en este tramo del calentamiento la velocidad es menor debido a la inercia térmica presente tomando en consideración el valor de temperatura en el inicio de la prueba.

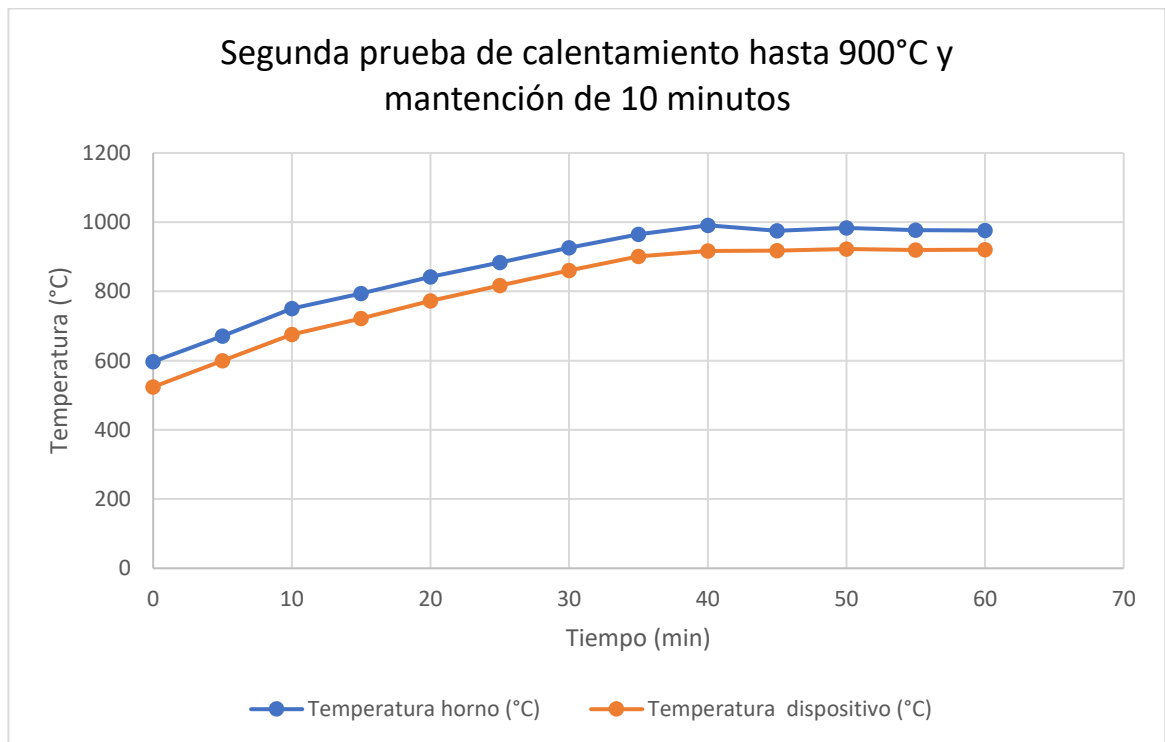


Gráfico 3 Prueba 2 calentamiento y mantención.

En la ilustración 59 se ha extraído nuevamente los datos registrados y se ha tomado el valor promedio en la diferencia de medición entre ambos termopares, con base en esos datos y lo mostrado en el gráfico 3, puede decirse que en promedio el termopar externo mide un valor de 66.27 °C menos que el valor medido por el termopar del horno.

La importancia en la precisión de esta diferencia permite garantizar que se alcance la temperatura necesaria en la probeta para alcanzar la fase austenítica y así evitar la presencia de fases indeseables de baja dureza.

Por otro lado, el registro de tiempo desde el inicio de la etapa de calentamiento hasta la finalización de la etapa de mantención es de gran importancia en cuanto al crecimiento de grano del material, ya que la exposición a la temperatura favorece este crecimiento, y contar con un monitoreo visual del tiempo desde el inicio del proceso ayuda a dar un mejor seguimiento a este aspecto durante el tratamiento.

Por otra parte, se puede observar en la mantención un mayor control de la temperatura, siempre teniendo en cuenta la diferencia de temperatura de los termopares, en conclusión, esto nos ayuda a controlar la austenización para que sea completa y posteriormente si se desea realizar un enfriamiento lento donde haya difusión a una misma temperatura, se podrá controlar con el dispositivo dichos parámetros, para la obtención de las microestructuras deseadas.

xi	yi	(xi-yi)	(xi-yi)^2
Temperatura horno (°C)	Temperatura de dispositivo (°C)	Diferencia (°C)	Diferencia^2
597	524	73	5329.00
671	599.75	71.25	5076.56
750	675.25	74.75	5587.56
794	722	72	5184.00
842	773	69	4761.00
884	817	67	4489.00
926	860.25	65.75	4323.06
965	901	64	4096.00
991	917	74	5476.00
975	918	57	3249.00
983	922.5	60.5	3660.25
977	919.3	57.7	3329.29
976	920.5	55.5	3080.25
SUMA			57640.98
SUMA/N-1			4803.41
DESVIACIÓN			69.31

Ilustración 59 Comparativa de la diferencia de medición.

5.3. Procedimiento de instalación

El dispositivo fue desarrollado como un equipo auxiliar externo al funcionamiento del horno, por lo tanto, cada vez que se utilice deberá ser instalado de acuerdo a las indicaciones que son descritas a continuación; posterior a su uso, deberá ser desmontado.

OBJETIVO

Estandarizar el proceso de instalación y operación del dispositivo de medición de temperatura y tiempo para la obtención de la curva de calentamiento del horno de tratamientos térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.

ALCANCES

- El procedimiento proporciona la información necesaria para instalar el dispositivo previo a su operación, detallando paso a paso las actividades con apoyo de imágenes de referencia.
- Se detallan los pasos para la operación del dispositivo, indicando la función de teclas y la forma de corregir errores en el ingreso de datos.
- Se indican los pasos a seguir para el desmontaje del dispositivo posterior a su utilización.

5.3.1. Instalación de módulo electrónico

MATERIALES A UTILIZAR

Cable USB B (Normalmente utilizado para conectar una impresora a computadora)

Adaptador de corriente para teléfono móvil 5V (como segunda opción en caso de no contar con computadora portátil)

1. Colocar conector tipo B en puerto B de dispositivo para energizar módulo, como se muestra en la ilustración 60.



Ilustración 60 Puertos de módulo.

2. Colocar conector USB en el puerto USB de la computadora portátil, como se muestra en la ilustración 61.



Ilustración 61 Conexión USB desde una computadora portátil.

3. En caso de no contar con computadora portátil, colocar conector USB de cable en adaptador de teléfono móvil de 5 V y conectar a tomacorriente, como se muestra en la ilustración 62.



Ilustración 62 Conexión desde adaptador de teléfono móvil 5V.

5.3.2. Instalación de soporte metálico para probetas.

Nota: Este paso debe realizarse antes de iniciar el calentamiento del horno.

1. Abrir la compuerta del horno con ayuda de la palanca anaranjada, mostrada en la ilustración 63.



Ilustración 63 Compuerta de horno de tratamientos térmicos Universidad de El Salvador.

2. Colocar soporte metálico en cámara interna del horno.

Asegurarse que el soporte quede ubicado en la entrada de la cámara, ya que, de acuerdo a la posición del termopar, se busca que las probetas se encuentren lo más cercanas posibles al punto de medición, como puede verse en la ilustración 64.



Ilustración 64 Soporte ubicado en cámara de horno de tratamientos térmicos de la Universidad de El Salvador.

3. Cerrar compuerta del horno, llevándola a la posición mostrada en la ilustración 65.



Ilustración 65 Cierre de compuerta de horno de tratamientos térmicos.

5.3.3. Instalación de termopar

1. Remover guarda de mirilla del horno, ver ilustración 66.



Ilustración 66 Guarda de horno de tratamientos térmicos.

2. Insertar termopar en el agujero de mirilla, visible al centro de la ilustración 67



Ilustración 67 Termopar insertado en mirilla de horno de tratamientos térmicos.

5.4. Procedimiento de operación

1. Inicio del dispositivo

1.1. Al conectar el dispositivo de acuerdo al procedimiento de instalación, se muestra lo siguiente en la pantalla. Presionar cualquier tecla para mostrar la pantalla de inicio, que se visualiza como en la ilustración 68.



Ilustración 68 Pantalla de energización de inicio de dispositivo.

1.2. En la pantalla de inicio se presentará un mensaje general que indica el nombre de la institución, Facultad y escuela. En la parte inferior del mensaje se muestran las opciones de "Iniciar" y "Apagar". Tales opciones son controladas con las teclas "*" (asterisco) y "#" (numeral) respectivamente, tal como se muestra en la ilustración 69.

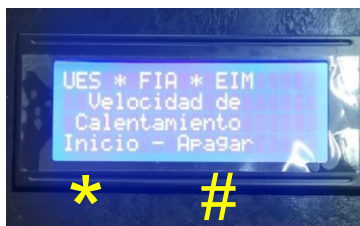


Ilustración 69 Pantalla de inicio de dispositivo.

2. Ingreso de parámetros

Nota: Si se comete un error al momento de digitar los datos, rellenar de 0 toda la línea y volver a ingresar el dato deseado.

2.1. Para dar inicio al ingreso de parámetros presionar la tecla asterisco que controla dicha opción en la pantalla.

2.2. Al presionar dicha tecla se nos muestra lo siguiente (ver ilustración 70).

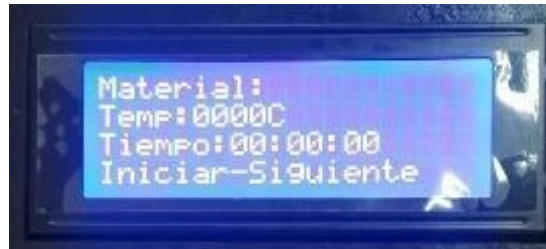


Ilustración 70 Pantalla de ingreso de parámetros.

2.3. Digitar con teclado numérico el material que se va a tratar térmicamente para la prueba (por ejemplo “1045” hablando de acero 1045). (Esta información es únicamente visual y no afecta el proceso de medición).

El mensaje debe visualizarse como se muestra en la ilustración 71.



Ilustración 71 Case con display LCD y teclado matricial.

2.4. Con la tecla numeral (opción “Siguiente” en la pantalla) bajar a la siguiente línea para ingresar la temperatura de seteo del termopar. Por ejemplo 0900 °C.

2.5. Bajar a la siguiente línea con la tecla numeral e ingresar el tiempo que se deberá registrar posterior a alcanzar la temperatura de seteo. En el ejemplo se ha ingresado un valor de 00:30:00, es decir 30 minutos, y este será el tiempo límite de la prueba luego de alcanzar la temperatura ingresada. En otras palabras, será el tiempo que la probeta deberá permanecer en el interior del horno. Al realizar esta acción, la pantalla debe visualizarse como en la ilustración 72.

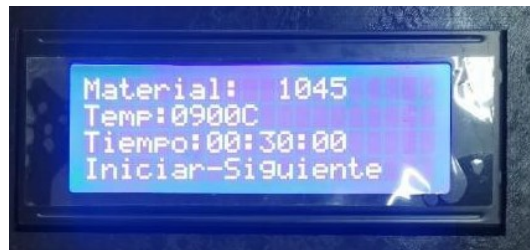


Ilustración 72 Pantalla para ingresar tiempo de prueba.

2.6. Dar inicio a la prueba presionando la tecla asterisco (*) en el teclado alfanumérico.

Se presentará la imagen mostrada en la ilustración 5-21.

Al iniciar la prueba, empezará a medirse la temperatura medida por el termopar y a registrarse el tiempo de calentamiento. (Ver ilustración 73).

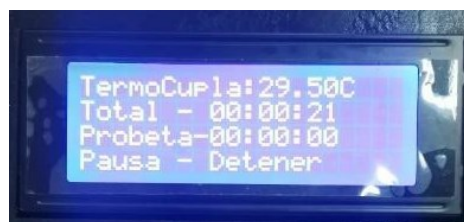


Ilustración 73 Pantalla de inicio de prueba.

Durante la prueba se observa la siguiente información, mostrada en la ilustración 74:

TermoCupla: Registra la temperatura actual medida por la termocupla

Total: Tiempo total desde que se dio inicio a la prueba (desde que se completó el paso anterior)

Probeta: Tiempo a partir de que se ha alcanzado la temperatura de seteo ingresada en el paso 2.5



Ilustración 74 Pantalla registro parámetros.

3. Datos de monitoreo

Una vez alcanzada la temperatura de seteo se deberá monitorear el tiempo registrado en la línea "Probeta"

En la imagen de referencia, ilustración 75, se observa lo siguiente:

TermoCupla: 36.00 C

Total – 00:01:04

Probeta – 00:00:25

Lo que significa que la termocupla se encuentra a 36 °C, la prueba dio inicio hace 1 minuto y 4 segundos; y la temperatura de seteo se ha alcanzado hace 25 segundos.



Ilustración 75 Pantalla de inicio de prueba.

4. Pausar la prueba presionando la tecla asterisco, se presenta la imagen mostrada en la ilustración 76.



Ilustración 76 Pantalla de pausa de prueba.

5. Para detener el registro de tiempo total y el de la probeta se debe presionar la tecla numeral. Con eso se podrá ver el valor total de tiempo de la prueba y el valor de tiempo de mantención de la probeta en el interior del horno, como se muestra en la ilustración 77.



Ilustración 77 Pantalla de registro total.

6. Presionando la tecla asterisco, se regresa a la pantalla principal indicada en el paso 1 y mostrada en la ilustración 78.



Ilustración 78 Pantalla principal.

7. Presionando nuevamente la tecla asterisco, se presentará la pantalla del paso 2.5 con la información que se ha ingresado, de modo que, para cargar nuevos datos, si se va a repetir la prueba, se debe rellenar con 0 (ceros) las filas para borrar los datos cargados y así cargar nuevos valores. (ver ilustración 79)

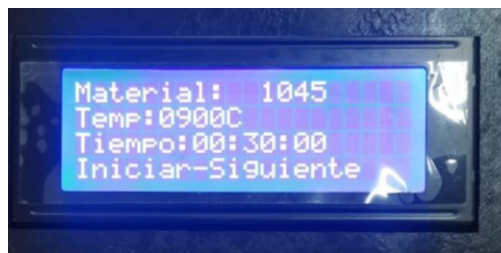


Ilustración 79 Pantalla de registro de nuevos datos para prueba.

8. En este punto del procedimiento, al presionar la tecla asterisco, la pantalla mostrada será la presentada en el paso 1. Y de ese modo se reiniciará el proceso. (Ver ilustración 80)



Ilustración 80 Pantalla de reinicio de proceso.

III.CONCLUSIONES

- Se elaboró la curva de calentamiento del horno de tratamientos térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica para obtener información detallada sobre su comportamiento operativo. Esta curva sirvió como línea base para comparar los resultados de las pruebas posteriores y analizar las diferencias en las mediciones de temperatura durante la aplicación de tratamientos térmicos.

-Se diseñó el dispositivo considerando su funcionalidad, dimensionamiento y la geometría del horno de la Escuela de Ingeniería Mecánica, seleccionando el material del soporte de acuerdo a las condiciones de temperatura y el tiempo al que sería expuesto. Las dimensiones del soporte se establecieron de tal manera que las probetas se encuentren a la altura donde será colocado el termopar para realizar la medición. El diseño de la carcasa se realizó de acuerdo con las dimensiones de los componentes electrónicos seleccionados a través de modelado 3D con SolidWorks.

-Se evaluó y se eligió la manera de monitorear las temperaturas y el tiempo de acuerdo a las diferentes opciones electrónicas al alcance, considerando el rango de temperatura y la disposición económica de cada opción. Se realizó la selección de un dispositivo intérprete para las señales del termopar, optando por el Arduino con el objetivo de proporcionar una interfaz de fácil lectura para el usuario, se implementó la programación en el lenguaje C, además se eligieron elementos de entrada y salida de datos como son la pantalla LCD y el teclado matricial.

-Se construyó el dispositivo conformado por el soporte metálico fabricado en acero inoxidable 304; y el módulo electrónico fabricado mediante impresión 3D en el cual se ensamblan los componentes electrónicos.

-Se realizaron pruebas de funcionamiento del dispositivo en las cuales se logró visualizar y comparar las diferencias de temperatura registradas por ambos termopares, lo cual representa el factor de corrección que deberá aplicarse en la temperatura al realizar un tratamiento térmico. Además, se dio monitoreo al tiempo a través del dispositivo desde que se dio inicio a la prueba.

-Se elaboró un procedimiento de instalación del dispositivo en el cual se detalla el paso a paso para el montaje de los módulos y las indicaciones para energizar el módulo electrónico. Además, se detalla la función de los botones del teclado utilizados para la operación del dispositivo y la información presentada en cada una de las pantallas mostradas en el proceso de operación.

- La disparidad en los valores obtenidos de temperatura acorde a la posición en la cámara del horno, destaca la necesidad de corregir los valores seteados de temperatura máxima en el horno. Corrigiendo el seteo del valor de temperatura, según los resultados obtenidos, se garantiza mayor fiabilidad para que el acero presente las condiciones de austenitización requeridas.

IV.RECOMENDACIONES

-Llevar a cabo una investigación con probetas de diferente sección transversal y evaluar la incidencia de ese aspecto en las propiedades obtenidas.

-Variar el tipo de material de la probeta, seleccionar entre otro tipo de acero o considerar un material no ferroso, como el aluminio o cuproaluminio, dadas sus similitudes con los aceros de medio carbono.

-Realizar una investigación variando la altura del soporte y evaluar la incidencia de este cambio en los resultados de la investigación.

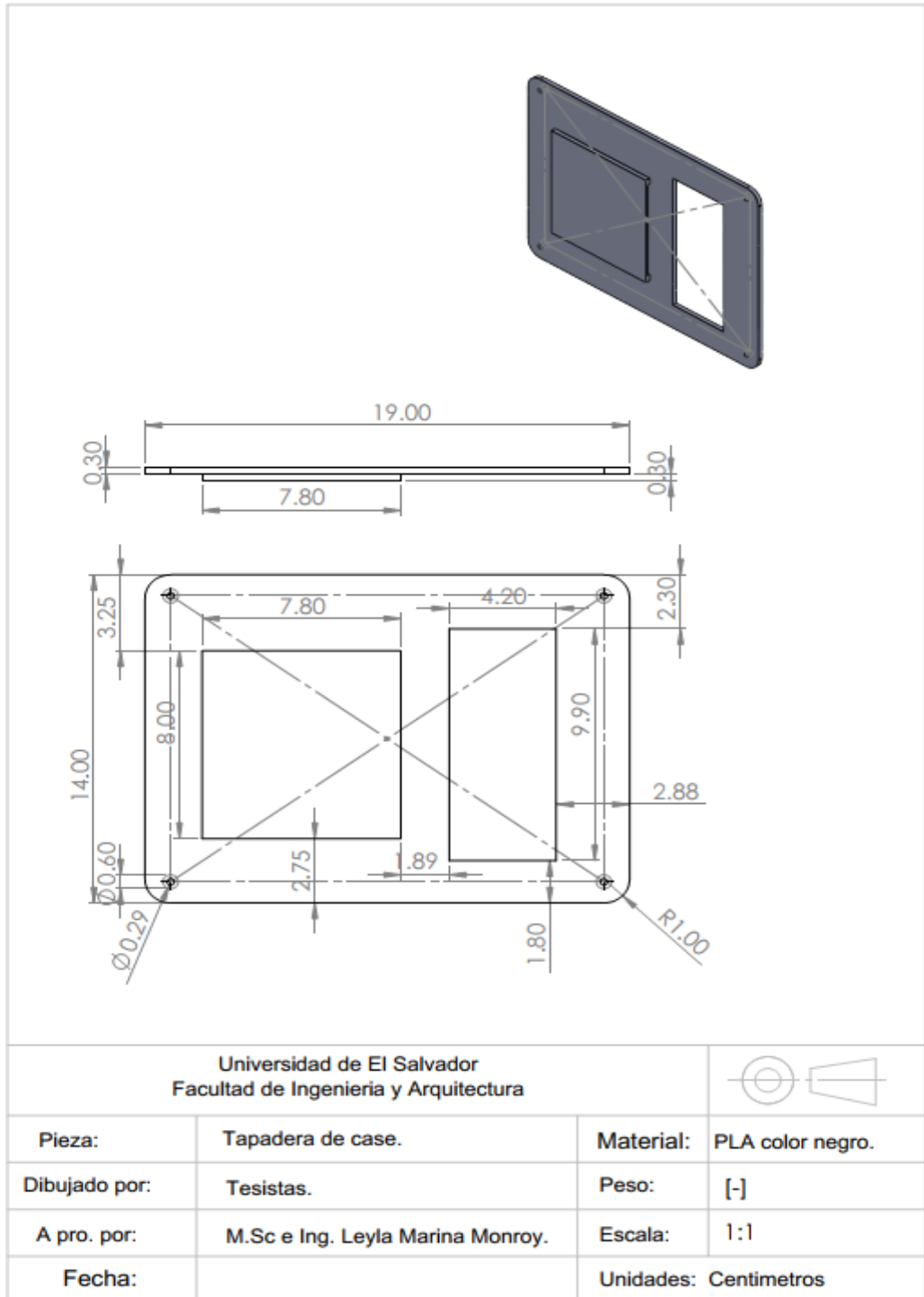
-Considerar el uso del dispositivo para investigaciones que apliquen diferentes tratamientos térmicos, donde pueda comprobarse si la corrección aplicada a la temperatura máxima, permite las condiciones de austenitización requeridas.

V.BIBLIOGRAFÍA

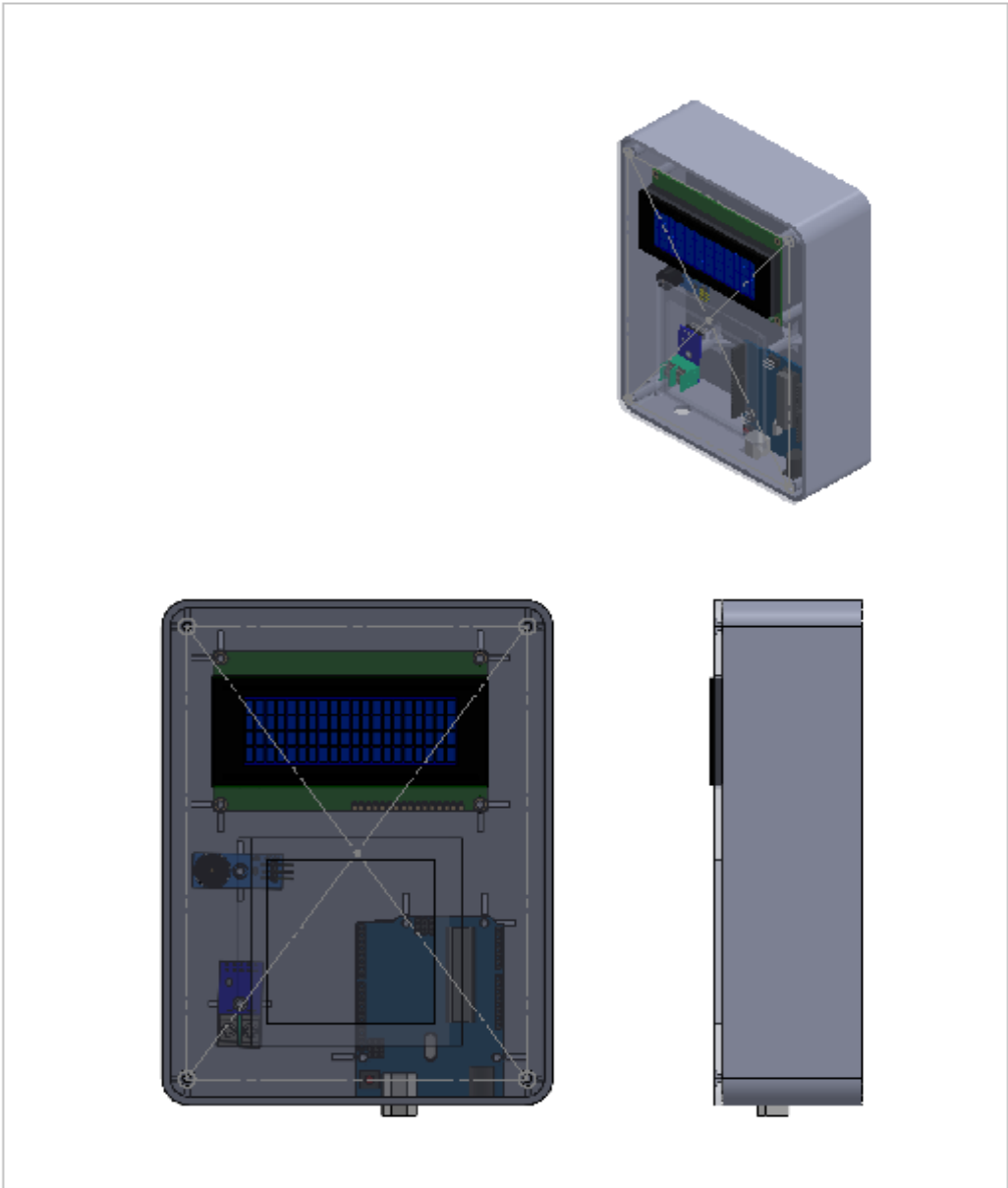
- Alqueraf. (2018). *github*. Obtenido de <https://gist.github.com/Alqueraf/34b27fb124f6f5cd9db96bfd27da82df>
- Avner, S. H. (1988). *Introducción a la metalurgia física*. Mexico.
- Committee, A. I. (1990). ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASTM International.
- Components, Q. (2023). *quartzcomponents*. Obtenido de <https://quartzcomponents.com/products/thermal-sensor-relay-module-max6675>
- Coral, H. D. (s.f.). Tratamiento térmico de temple, influencia del medio de enfriamiento. *Tratamiento termico de temple, influencia del medio de enfriamiento*. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Donald R. Askeland, P. P. (2011). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Cengage Learning.
- esmarr58. (2017). *github*. Obtenido de <https://gist.github.com/esmarr58/269b70b46375f029d341c477006dced3>
- formlabs. (2011). *formlabs*. Obtenido de <https://formlabs.com/latam/blog/materiales-impresion-3d/>
- Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*.
- Lab-Volt., P. d. (2005). Control de proceso de temperatura. En L.-V. (. Ltda..
- master. (2022). *github*. Obtenido de <https://github.com/RobTillaart/MAX6675/blob/master/MAX6675.cpp>
- Sánchez, P. (20 de Enero de 2020). *povedaTIC*. Obtenido de <https://povedatic.wordpress.com/2020/01/20/practica-placa-arduino/>
- Steren. (1956). *Steren*. Obtenido de <https://www.steren.com.sv/teclado-numerico-matrical-4-x-4.html>
- WINSTAR. (1998). *Winstar Display Co. Ltd*. Obtenido de <https://www.winstar.com.tw/es/products/character-lcd-display-module/lcd-16x4.html>

VI.ANEXOS

Anexo A Plano de tapadera de case.

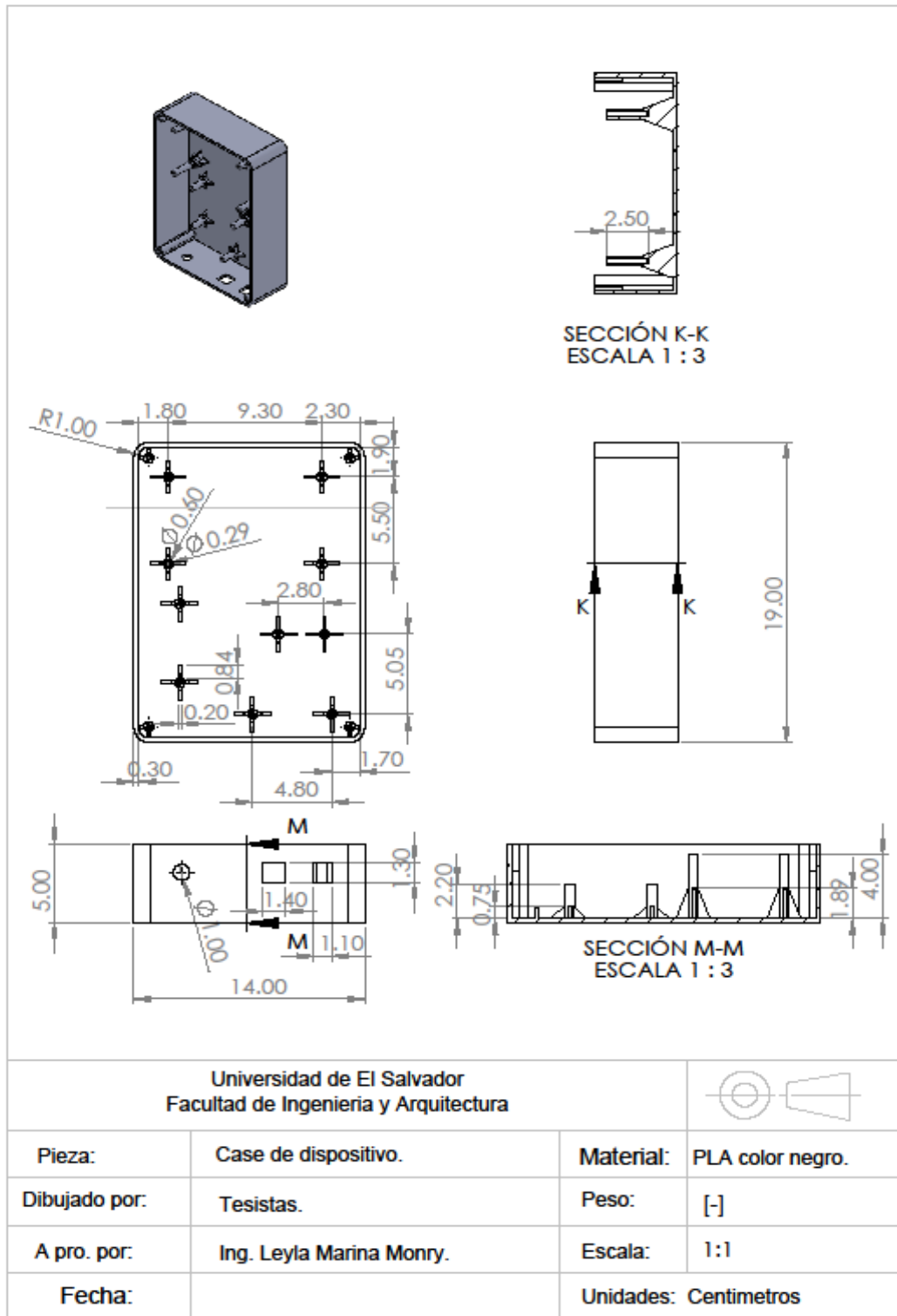


Anexo B Plano de dispositivo.

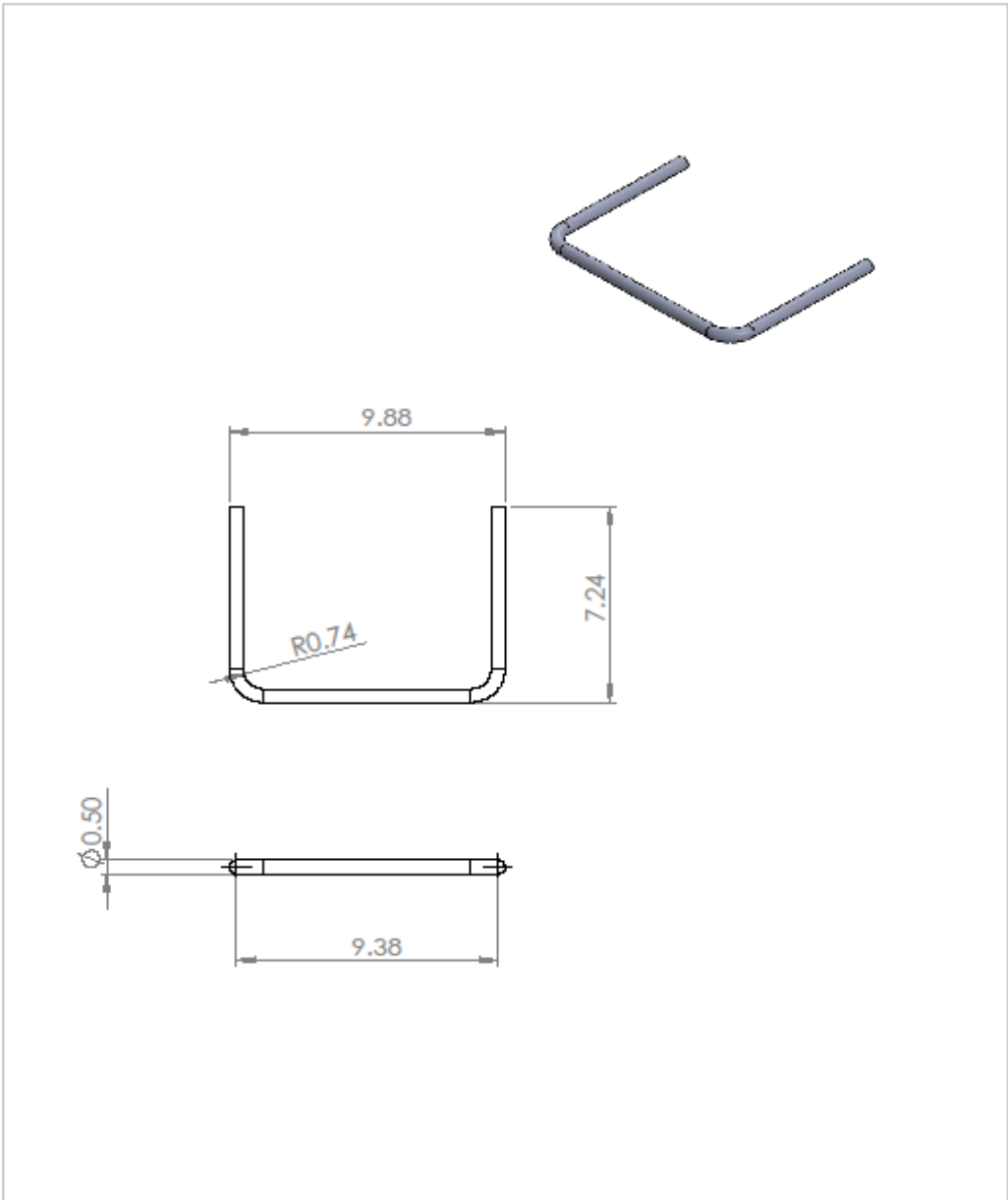


Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura			
Pieza:	Dispositivo.	Material:	PLA color negro.
Dibujado por:	Tesistas.	Peso:	[-]
A pro. por:	Ing. Leyla Marina Monry.	Escala:	1:1
Fecha:		Unidades:	Centímetros

Anexo C Plano de case de dispositivo.

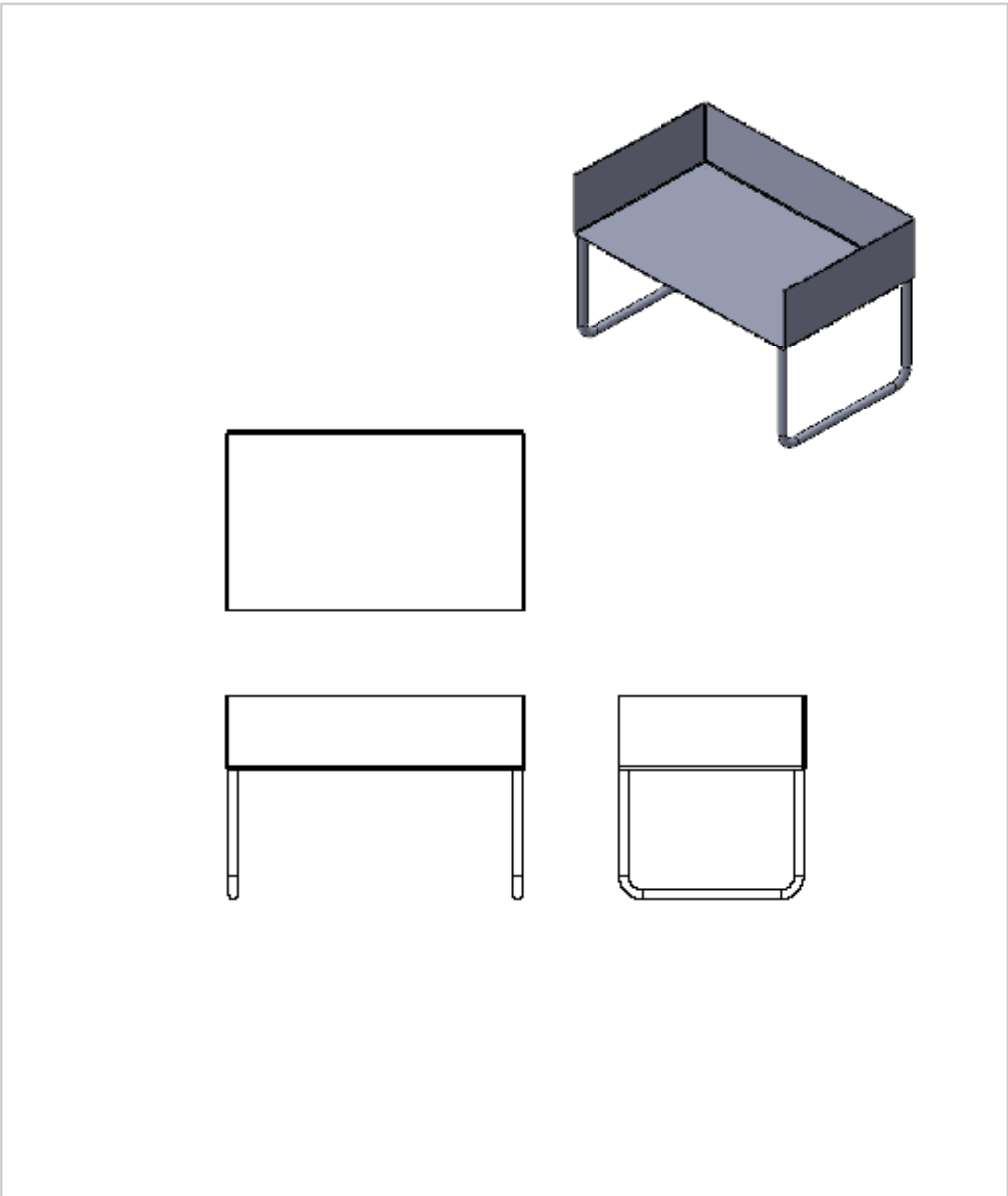


Anexo D Plano de patas de soporte.

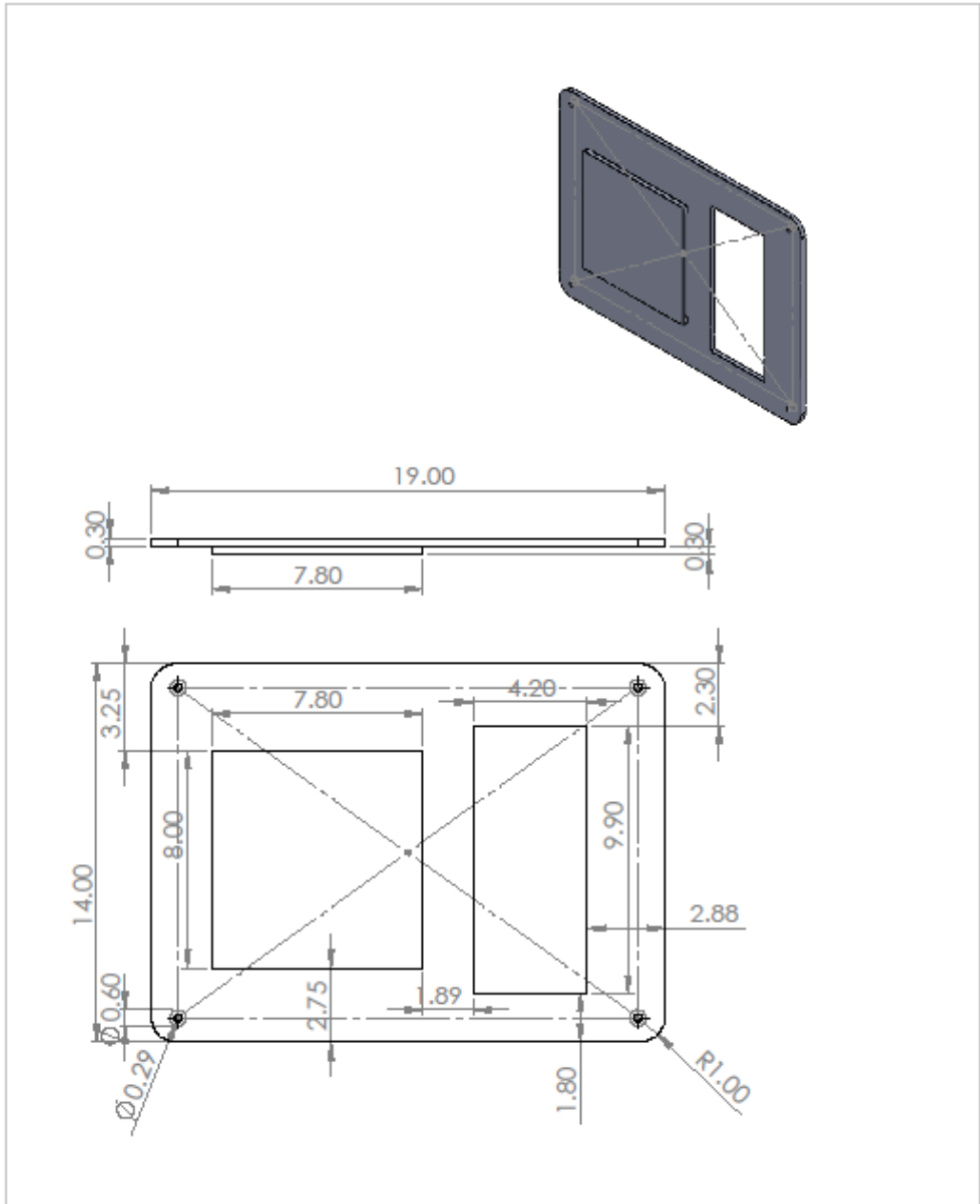


Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura			
Pieza:	Patas de soporte.	Material:	AISI 304
Dibujado por:	Tesistas.	Peso:	[-]
A pro. por:	Ing. Leyla Marina Monroy.	Escala:	1:1
Fecha:		Unidades:	Centímetros

Anexo E Plano de soporte.



Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura			
Pieza:	Soporte.	Material:	AISI 304
Dibujado por:	Tesistas.	Peso:	[-]
A pro. por:	Ing. Leyla Marina Monroy.	Escala:	1:1
Fecha:		Unidades:	Centímetros



Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura			
Pieza:	Tapadera de caja.	Material:	PLA color negro.
Dibujado por:	Tesistas.	Peso:	[-]
A pro. por:	Ing. Leyla Marina Monry.	Escala:	1:1
Fecha:		Unidades:	Centímetros

Anexo F Código de programación.

Menus.h

```
1 #include <Arduino.h>
2
3 int pantallaActual = 0;
4 int estadoPrueba = 0;
5
6 void(* resetFunc) (void) = 0;
7
8 void PantallaInicial()
9 {
10     lcd.clear();
11     lcd.setCursor(0,0);
12     lcd.print("UES * FIA * EIM ");
13     lcd.setCursor(0,1);
14     lcd.print("  Velocidad de  ");
15     lcd.setCursor(0,2);
16     lcd.print(" Calentamiento  ");
17     lcd.setCursor(0,3);
18     lcd.print("Inicio - Apagar ");
19 }
20
21 bool NeedZeroDigit(int val)
22 {
23     return val < 10;
24 }
25
26 String TimeToWatch(int segundos)
27 {
28     int horas = segundos / 3600;           // 1 hora = 3600 segundos
29     int minutos = (segundos % 3600) / 60; // 1 minuto = 60 segundos
30     int segundosRestantes = segundos % 60;
31
32     String horaTxt = "";
33     if(NeedZeroDigit(horas)){horaTxt += "0";}
34     horaTxt += horas;
35     horaTxt += ":";
36     if(NeedZeroDigit(minutos)){horaTxt += "0";}
37     horaTxt += minutos;
38     horaTxt += ":";
39     if(NeedZeroDigit(segundosRestantes)){horaTxt += "0";}
40     horaTxt += segundosRestantes;
41     return horaTxt;
42 }
43
44 String materialPrueba = "          "; //7 caracteres
45 String temperaturaPrueba = "0000"; //4 caracteres
46 String tiempoPrueba = "00:00:00";
47
48 int labelSeleccionado = 0;
49 void PantallaSeleccionarPrueba()
50 {
```

```

51     String salida = "";
52
53     lcd.clear();
54     lcd.setCursor(0,0);
55     salida = "Material:";
56     salida += materialPrueba;
57     lcd.print(salida);
58     lcd.setCursor(0,1);
59     salida = "Temp:";
60     salida += temperaturaPrueba;
61     salida += "C";
62     lcd.print(salida);
63     lcd.setCursor(0,2);
64     salida = "Tiempo:";
65     salida += tiempoPrueba;
66     lcd.print(salida);
67     lcd.setCursor(0,3);
68     lcd.print("Iniciar-Siguiente");
69 }
70
71 String eliminarCaracteres(String cadena, char caracter)
72 {
73     String nuevaCadena = "";
74     for (int i = 0; i < cadena.length(); i++)
75     {
76         if (cadena[i] != caracter)
77         {
78             nuevaCadena += cadena[i];
79         }
80     }
81     return nuevaCadena;
82 }
83
84 void UpdatePrueba(char caracter)
85 {
86     if (!isdigit(caracter)) return;
87
88     if(labelSeleccionado == 0)
89     {
90         materialPrueba += caracter;
91         materialPrueba = materialPrueba.substring(1, 7);
92     }
93     else if(labelSeleccionado == 1)
94     {
95         temperaturaPrueba += caracter;
96         temperaturaPrueba = temperaturaPrueba.substring(1, 5);
97     }
98     else if(labelSeleccionado == 2)
99     {
100         String currentTxt = eliminarCaracteres(tiempoPrueba, ':');
101         tiempoPrueba = currentTxt.charAt(1);
102         tiempoPrueba += currentTxt.charAt(2);
103         tiempoPrueba += ':';
104         tiempoPrueba += currentTxt.charAt(3);
105         tiempoPrueba += currentTxt.charAt(4);
106         tiempoPrueba += ':';

```

```

107         tiempoPrueba += currentTxt.charAt(5);
108         tiempoPrueba += caracter;
109     }
110 }
111
112 int TiempoDePrueba()
113 {
114     String pairTXT = ""; //00:00:00
115     pairTXT = tiempoPrueba.charAt(6);
116     pairTXT += tiempoPrueba.charAt(7);
117     int segundosTotales = atoi(pairTXT.c_str()); //sec
118
119     pairTXT = tiempoPrueba.charAt(3);
120     pairTXT += tiempoPrueba.charAt(4);
121     segundosTotales += atoi(pairTXT.c_str()) * 60; //min
122
123     pairTXT = tiempoPrueba.charAt(0);
124     pairTXT += tiempoPrueba.charAt(1);
125     segundosTotales += atoi(pairTXT.c_str()) * 3600; //hour
126     return segundosTotales;
127 }
128 int tiempoTotalPrueba = 0;
129 bool pause = false;
130 bool stop = false;
131 bool tempWasReach = false;
132
133 int tiempoTotal = 0;
134 void TiempoTotalOneSecond()
135 {
136     if(stop) return;
137     tiempoTotal++;
138 }
139
140 void TiempoTotalPruebaOneSecond()
141 {
142     if(stop) return;
143     if(pause) return;
144     if(!tempWasReach) return;
145
146     tiempoTotalPrueba++;
147 }
148 void UpdateTempWasReach()
149 {
150     if(!tempWasReach)
151     {
152         //VER TEMP ACTUAL Y TEMP TARGER
153         float tempActual = ReadCelsius();
154         float tempTarget = atof(temperaturaPrueba.c_str());
155         if(tempActual >= tempTarget)
156         {
157             tempWasReach = true;
158         }
159     }
160 }
161 void UpdateLedStatus()
162 {

```

```

163     if(estadoPrueba == 0 && pantallaActual == 2)
164     {
165         int secsDePrueba = tiempoTotalPrueba;
166         int secsMaxDePrueba = TiempoDePrueba();
167         if(secsDePrueba >= secsMaxDePrueba)
168         {
169             digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
170         }
171         else
172         {
173             digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
174         }
175     }
176     else
177     {
178         digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
179     }
180 }
181
182 void PantallaEstadoPrueba()
183 {
184     String salida = "";
185     lcd.clear();
186     lcd.setCursor(0,0);
187     salida = "TermoCupla:";
188     salida += ReadCelsius();
189     salida += "C";
190     lcd.print(salida);
191     lcd.setCursor(0,1);
192     salida = "Total - ";
193     salida += TimeToWatch(tiempoTotal);
194     lcd.print(salida);
195     lcd.setCursor(0,2);
196     salida = "Probeta-";
197     salida += TimeToWatch(tiempoTotalPrueba);
198     lcd.print(salida);
199     lcd.setCursor(0,3);
200     //PAUSAR-CONTINUAR-INICIO
201     if(estadoPrueba == 0)
202     {
203         lcd.print("Pausa - Detener ");
204     }
205     else if(estadoPrueba == 1)
206     {
207         lcd.print("Continuar - Detener");
208     }
209     else if(estadoPrueba == 2)
210     {
211         lcd.print("Inicio - Apagar ");
212     }
213 }
214
215 void ActualizarUI(char caracter)
216 {
217     if (pantallaActual == 0)
218     {

```

```

219     PantallaInicial();
220 }
221 else if(pantallaActual == 1)
222 {
223     UpdatePrueba(caracter);
224     PantallaSeleccionarPrueba();
225 }
226 else if(pantallaActual == 2)
227 {
228     PantallaEstadoPrueba();
229 }
230 else
231 {
232     PantallaInicial();
233 }
234 }
235
236 void BtnIzquierda()
237 {
238     if (pantallaActual == 0)
239     {
240         //GO TO NEXT PANTALLA
241         pantallaActual = 1;
242     }
243     else if(pantallaActual == 1)
244     {
245         //Iniciar el monitoreo en la Prueba seleccionadas
246         pantallaActual = 2;
247         estadoPrueba = 0;
248         tiempoTotal = 0;
249         tiempoTotalPrueba = 0;
250         pause = false;
251         tempWasReach = false;
252         stop = false;
253     }
254     else if(pantallaActual == 2)
255     {
256         //PAUSAR-CONTINUAR-INICIO
257         if(stop)
258         {
259             pantallaActual = 0;
260             estadoPrueba = 0;
261         }
262         else if(estadoPrueba == 0)
263         {
264             estadoPrueba = 1;
265             pause = true;
266         }
267         else if(estadoPrueba == 1)
268         {
269             estadoPrueba = 0;
270             pause = false;
271         }
272     }
273 }
274

```

```

275 #define TOTAL OPCIONES 3
276
277 void BtnDerecha()
278 {
279     if (pantallaActual == 0)
280     {
281         //APAGAR
282         lcd.clear();
283         resetFunc();
284     }
285     else if (pantallaActual == 1)
286     {
287         //SIGUENTE PRUEBA
288         labelSeleccionado++;
289         if (labelSeleccionado >= TOTAL OPCIONES)
290         {
291             labelSeleccionado = 0;
292         }
293     }
294     else if (pantallaActual == 2)
295     {
296         //DETENER-DETENER-APAGAR
297         if (estadoPrueba == 0 || estadoPrueba == 1)
298         {
299             estadoPrueba = 2;
300             stop = true;
301         }
302         else if (estadoPrueba == 2)
303         {
304             lcd.clear();
305             resetFunc();
306         }
307     }
308 }

```

Pantalla.h

```

1 #include <Arduino.h>
2
3 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 4);
5
6 void IniciarPantalla()
7 {
8     lcd.init();
9     lcd.backlight();
10    lcd.setCursor(0, 0);
11 }

```

Tablero.h

```

1 #include <Arduino.h>
2
3 #include <Keypad.h>
4 const byte ROWS = 4;

```

```

5 const byte COLS = 4;
6 char keys[ROWS][COLS] = {
7   {'1','2','3','A'},
8   {'4','5','6','B'},
9   {'7','8','9','C'},
10  {'*','0','#','D'}
11 };
12
13 byte rowPins[ROWS] = {9, 8, 7, 6}; //connect to the row pinouts of
14 the keypad
15 byte colPins[COLS] = {5, 4, 3, 2}; //connect to the column pinouts
16 of the keypad

    Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS,
        COLS );

```

TermoCupla.h

```

1 #include <Arduino.h>
2
3 #include <max6675.h>
4
5 int thermoDO = 10;
6 int thermoCS = 11;
7 int thermoCLK = 12;
8
9 MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
10
11 float ReadCelsius()
12 {
13     return thermocouple.readCelsius();
14 }

```

Main.cpp

```

1 #include <Arduino.h>
2
3 #include <TermoCupla.h>
4 #include <Tablero.h>
5 #include <Pantalla.h>
6 #include <Menus.h>
7
8 #define ONE_SECOND 1000
9 unsigned long lastTime;
10
11 void setup()
12 {
13     pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
14     IniciarPantalla();
15     char key = keypad.getKey();
16     while(key == NO_KEY)
17     {
18         key = keypad.getKey();
19         delay(50);
20     }
21     delay(450);
22     lastTime = millis();

```

```

23 }
24
25 void OneSecond()
26 {
27     unsigned long currentTime = millis();
28     if(currentTime - lastTime >= ONE_SECOND)
29     {
30         UpdateLedStatus();
31         UpdateTempWasReach();
32         TiempoTotalOneSecond();
33         TiempoTotalPruebaOneSecond();
34
35         ActualizarUI('-');
36         lastTime = currentTime;
37     }
38 }
39
40 void loop()
41 {
42     OneSecond();
43
44     char key = keypad.getKey();
45
46     if (key != NO_KEY) {
47         if(key == '*')
48         {
49             BtnIzquierda();
50         }
51         else if(key == '#')
52         {
53             BtnDerecha();
54         }
55
56         ActualizarUI(key);
57         Serial.println(key);
58         delay(500);
59     }
60 }

```