



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE
INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS

UPIIZ

Trabajo Terminal

“Implementación de un sistema semiautomático, de monitoreo y control para el crecimiento de monocristales mediante el método de Bridgman”

Presentan:

Diego Alexis Villagrana Arteaga

Osmar Jair Villagrana Prieto

Alberto Antonio Yubaile Kalixto

Asesores:

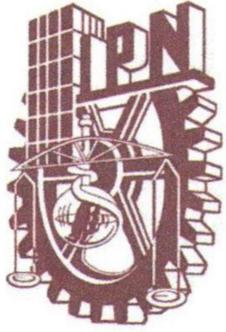
Dr. Miguel Ángel Suárez Rosales

Dr. Miguel Fernando Delgado Pamanes

M. en I. Carlos Cuevas Cortés

Zacatecas, Zac. junio 2018





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE
INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS

UPIIZ

Trabajo Terminal

“Implementación de un sistema semiautomático, de monitoreo y control para el crecimiento de monocristales mediante el método de Bridgman”

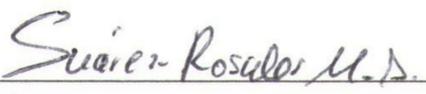
Presentan:


Diego Alexis Villagrana Arteaga


Osmar Jair Villagrana Prieto

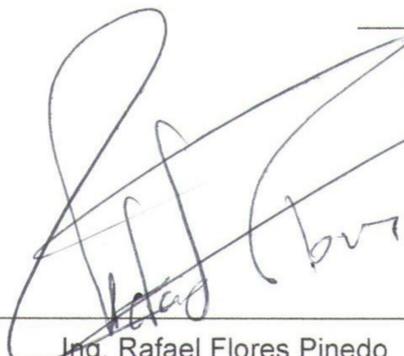

Alberto Antonio Yubaile Kalixto

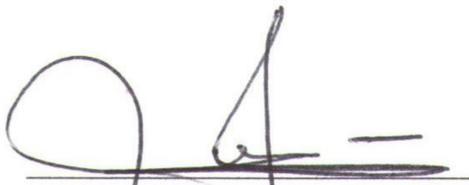
Asesores:


Dr. Miguel Ángel Suárez Rosales


Dr. Miguel Fernando Delgado Pamanes


M. en I. Carlos Cuevas Cortés


Ing. Rafael Flores Pinedo
Presidente del jurado


M. en P. y M. Jorge Talavera Otero
Secretario del jurado



Zacatecas, Zac. junio 2018

Autorización de uso de obra
Instituto Politécnico Nacional
P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad los que suscriben Diego Alexis Villagrana Arteaga, Osmar Jair Villagrana Prieto y Alberto Antonio Yubaile Kalixto, estudiantes del programa de Ingeniería Mecatrónica, con números de boleta 2014670205, 2014670107 y 2014670109 respectivamente, adscritos a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifestamos ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "Implementación de un sistema semiautomático, de monitoreo y control para el crecimiento de monocristales mediante el método de Bridgman", en adelante "El Trabajo de Titulación" y del cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgamos a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante "El IPN", autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales "El Trabajo de Titulación" por tiempo indefinido a partir de la fecha de la presente autorización.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento nuestra calidad de autores de "El Trabajo de Titulación".

Adicionalmente, y en nuestra calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de "El Trabajo de Titulación", manifestamos que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por los suscritos respecto de "El Trabajo de Titulación", por lo que deslindamos de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "El Trabajo de Titulación" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumimos las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 7 de junio del 2019.

Atentamente



Diego Alexis Villagrana Arteaga



Osmar Jair Villagrana Prieto



Alberto Antonio Yubaile Kalixto



Nacional

Instituto Politécnico

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas

Formato 01. Selección de la Opción de Titulación.



Zacatecas, Zac., a 14 de Marzo del 2018

Asunto: Solicitud de registro de la opción de titulación.

Attn. Departamento de Evaluación y Seguimiento Académico.

SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

Presente

La presente es para solicitar a usted con base en el Artículo 17 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el registro de la opción por la cual deseo obtener el título profesional del Programa Académico de Ingeniería en Mecatrónica.

Opción de titulación seleccionada: Curricular

Alumno: Diego Alexis Villagrana Arteaga

No. de Boleta: 2014670205

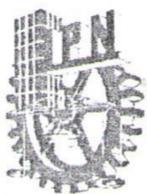
Título del proyecto: "Implementación de un sistema semiautomático, de monitoreo y control para el crecimiento de monocristales mediante el método de Bridgman".

Lo anterior para dar continuidad a la gestión administrativa para desarrollar y dar cumplimiento satisfactorio a las actividades propias de la opción de titulación elegida de forma previa al Acto Protocolario de Titulación.

Atentamente

DIEGO ALEXIS VILLAGRANA ARTEAGA





Zacatecas, Zac., a 14 de Marzo del 2018

Asunto: Solicitud de registro de la opción de titulación.

Atte. Departamento de Evaluación y Seguimiento Académico.

SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

Presente

La presente es para solicitar a usted con base en el Artículo 17 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el registro de la opción por la cual deseo obtener el título profesional del Programa Académico de INGENIERÍA MECATRÓNICA.

Opción de titulación seleccionada: Curricular

Alumno: Osmar Jair Villagrana Prieto

No. de Boleta: 2014670107

Título del proyecto: "Implementación de un sistema semiautomático, de monitoreo y control para el crecimiento de monocristales mediante el método Bridgman".

Lo anterior para dar continuidad a la gestión administrativa para desarrollar y dar cumplimiento satisfactorio a las actividades propias de la opción de titulación elegida de forma previa al Acto Protocolario de Titulación.

Atentamente

Osmar Jair Villagrana Prieto





Zacatecas, Zac., a 31 de Mayo del 2019

Asunto: Solicitud de registro de la opción de titulación.

Attn. Departamento de Evaluación y Seguimiento Académico.

SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

Presente

La presente es para solicitar a usted con base en el Artículo 17 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el registro de la opción por la cual deseo obtener el título profesional del Programa Académico de Ingeniería Mecatrónica.

Opción de titulación seleccionada: Curricular

Alumno: Alberto Antonio Yubaile Kalixto

No. de Boleta: 2014670109

Título del proyecto: "Implementación de un sistema semiautomático, de monitoreo y control para el crecimiento de monocristales mediante el método de Bridgman".

Lo anterior para dar continuidad a la gestión administrativa para desarrollar y dar cumplimiento satisfactorio a las actividades propias de la opción de titulación elegida de forma previa al Acto Protocolario de Titulación.

Atentamente

ALBERTO ANTONIO YUBAILE KALIXTO

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional por haber aportado el recurso económico para el desarrollo de este trabajo con los proyectos 20172184 y 20181985.

Así mismo, agradecemos a la planta docente, técnicos y compañeros de la UPIIZ que intervinieron en nuestro desarrollo como estudiantes de ingeniería, así como los que estuvieron apoyándonos a lo largo del proyecto.

DIEGO ALEXIS VILLAGRANA ARTEAGA

Agradezco al Dr. Miguel Ángel Suárez Rosales, gracias a él fue posible el progreso de este proyecto, ya que aportó el presupuesto para financiarlo, y nos brindó de su experiencia académica a lo largo del desarrollo del mismo.

Agradezco a mis asesores, Dr. Miguel Fernando Delgado Pamanes y al maestro Carlos Cuevas Cortés por su apoyo y asesorías en este proyecto. Además también por la preparación académica a lo largo de la carrera.

Agradezco a mis padres Carmen Leticia Arteaga Domínguez, Alejandro González López y Oliverio Villagrana Montalvo porque me han apoyado mucho a lo largo de mis estudios, siempre me dieron las herramientas, la confianza, el buen ejemplo para seguir esforzándome y superándome a mí mismo.

Agradezco a mis amigos Osmar Jair Villagrana Prieto y Alberto Antonio Yubaile Kalixto por su amistad y apoyo en este camino que recorrimos juntos para cumplir nuestras aspiraciones. Gracias a ellos he podido crecer y aprender mucho en todos estos años.

Gracias Anakaren Cadena García por ayudarme crecer y madurar de manera personal. De igual manera por su apoyo y afecto a lo largo de los años.

Agradezco a mi abuela María de los Ángeles Domínguez por siempre estar a mi lado brindándome su apoyo incondicional, ya que sin sus ánimos y su cariño no sería para mí posible poder llegar hasta estas instancias.

Agradezco a técnicos y maestros que he tenido a lo largo de la carrera por ayudarme en mi desarrollo profesional.

Agradezco a mis amigos y seres queridos más cercanos por apoyarme en este tramo de mi vida ya que me han brindado de su ánimo para seguir esforzándome en este ámbito académico.

Un agradecimiento especial a mi tío Alberto Arteaga (que descanse en paz) ya que desde mi infancia e incluso a lo largo de mi carrera ha sido una figura paterna para mí, y me ha brindado su ayuda dentro de sus posibilidades tanto de manera personal, como académica de forma altruista.

OSMAR JAIR VILLAGRANA PRIETO

A mi alma máter, el Instituto Politécnico Nacional, así como su planta docente, por haberme brindado una educación de calidad, así como el impulsarme a indagar y sumergirme en el ámbito académico para mi crecimiento como estudiante, por lo que siempre llevaré en alto sus siglas IPN en mi desempeño como futuro profesionista.

A mis asesores, sin quienes no hubiese podido desarrollar este proyecto, así como mi crecimiento en el ámbito académico a lo largo de la carrera.

A mis padres, Leticia Prieto Jauregui y J. Jesús Villagrana de Ávila, quienes a lo largo de mis estudios me han apoyado y dado todo para seguir adelante y cumplir mis metas.

A mi hermana Citlallitl Selene, que a pesar de estar lejos siempre me enseña a sobreponerme a los obstáculos y me inspira a superarme cada día.

A mi novia Sara, por el cariño y el apoyo incondicional en mis momentos difíciles a lo largo de este proyecto.

A mi familia en general, por estar siempre apoyándome y estar al pendiente de mí en mi trayectoria académica, en especial a quienes se nos adelantaron en el camino, que siempre vivirán en mi corazón.

A mis amigos y compañeros en esta etapa de mi vida, Diego Alexis, Alberto Antonio y Jesús Eduardo, con quienes he compartido apreciados momentos en estos cinco años de mi vida que nunca olvidaré.

ALBERTO ANTONIO YUBAILE KALIXTO

Agradezco al Dr. Miguel Ángel Suárez Rosales ya que este proyecto fue llevado a cabo gracias a su apoyo académico y económico. Bajo su asesoría nos dio las herramientas necesarias para lograr los objetivos planteados.

Agradezco al Dr. Miguel Fernando Delgado Pamanes por la asesoría y apoyo brindado a lo largo del desarrollo del proyecto y de mi preparación profesional. De igual forma agradezco al maestro Carlos Cuevas Cortés por su asesoría en el proyecto y mi formación profesional.

Agradezco a mis padres María Taide Kalixto Sánchez y Alberto Yubaile Pérez por permitirme lograr una de las metas más grandes en mi vida. Gracias a todo su apoyo y sus enseñanzas es como pude llegar a culminar mis estudios de la mejor forma posible.

Agradezco a mis amigos Osmar Jair Villagrana Prieto y Diego Alexis Villagrana Arteaga por todo su apoyo y amistad que me han dado en todos estos años. Gracias a sus conocimientos y habilidades fue posible el desarrollo de este proyecto. También agradezco a Jesús Eduardo Pacheco Villegas por su apoyo a lo largo de toda la carrera.

Agradezco a mi hermano Charbel Yubaile Kalixto, a cada uno de mis tíos, primos, y cada miembro de mi familia, ya que siempre me han ayudado en todo momento de mi vida. Su apoyo brindado fue un gran pilar para la culminación de mis estudios.

Agradezco a mi novia Paola de Jesús Pacheco Vega por todo su apoyo, cariño y todas sus enseñanzas brindadas a lo largo de mi preparación profesional y mi desarrollo integral.

Agradezco al Dr. Panayotis Vyridis por su tutela y apoyo brindado a lo largo de la carrera, siendo un gran ejemplo y una de mis motivaciones para aspirar siempre a más.

Agradezco a cada uno de los maestros y técnicos de la UPIIZ-IPN que me ayudaron en mi desarrollo profesional.

Agradezco a todos mis amigos y personas cercanas que me apoyaron en este largo proceso. Sus pláticas, consejos y cariño fueron de gran importancia para mi desarrollo.

RESUMEN

En el presente documento se describe el análisis, diseño, construcción e implementación de un sistema semiautomático de solidificación unidireccional para la obtención de monocristales en aleaciones principalmente de aluminio, zinc y magnesio por el método de Bridgman, el cual, está constituido de tres sistemas principales para el desarrollo del proceso: calentamiento, enfriamiento y movimiento. El sistema de calentamiento consta de un horno resistivo en el cual se realiza la fundición de la muestra, con una temperatura controlada y regulable a un máximo de 800 °C; el sistema de enfriamiento hidráulico permite regular un flujo laminar, mismo que propicia la solidificación del material y el sistema de movimiento, que desplaza el crisol de forma lineal a través de los sistemas anteriores con una velocidad regulable mínima de hasta 496 nm/s. Por otro lado, a través de una interfaz hombre-máquina (HMI, por su acrónimo en inglés Human-Machine Interface), y un sistema de control electrónico, se manipulan los parámetros de velocidad desplazamiento del crisol, así como el ajuste del flujo del líquido, y temperatura del horno. También es posible realizar el monitoreo de la temperatura dentro del crisol durante el periodo de solidificación de la muestra, con lo que se obtiene finalmente el registro de estos datos en un archivo para su posterior estudio. La implementación de este dispositivo tiene como propósito principal su aplicación en el área de metalurgia física y desarrollo de ciencia básica dentro de la UPIIZ-IPN.

PALABRAS CLAVE

Método Bridgman, monocristales, control, monitoreo, interfaz hombre-máquina.

ABSTRACT

This work presents the analysis, design, construction and implementation of a semi-automatic unidirectional solidification system for the growth of single crystals by the Bridgman method in aluminum, zinc and magnesium alloys. It is composed by three main systems: heating, cooling and movement. The heating system consist of a resistive furnace, where the melting of the sample takes place, and it provides a maximum adjustable temperature of 800 °C, the hydraulic cooling system allows an adjustable laminar flow, allowing the solidification of the material, and the movement system allows the linear displacement of the crucible with a minimum adjustable speed of 496 nm/s. On the other hand, the movement velocity of the crucible, the adjustment of the flow of the liquid and temperature of the furnace parameters will be manipulated by a human-machine interface (HMI) and by an electronic control system. In addition, a temperature monitoring will be carried out inside the crucible during the solidification period of the sample and its registration will be obtained in an archive for further study. The main purpose of the construction of this device is the application in the physical metallurgical area and development of basic science within the UPIIZ-IPN.

KEYWORDS

Bridgman method, single crystals, control, monitoring, human-machine interface.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	I
Diego Alexis Villagrana Arteaga	II
Osmar Jair Villagrana Prieto	III
Alberto Antonio Yubaile Kalixto.....	IV
RESUMEN	V
PALABRAS CLAVE.....	V
ABSTRACT	VI
KEYWORDS	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
INTRODUCCIÓN	XIV
OBJETIVOS	XVI
Objetivo general.....	XVI
Objetivos específicos.....	XVI
JUSTIFICACIÓN	XVIII
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES RELEVANTES.....	1
1.1 Generalidades.....	2
1.1.1 Monocristales.....	2
1.1.2 Solidificación de monocristales.....	2
1.1.3 Velocidades de crecimiento.....	3
1.1.4 Método de Bridgman	5
1.2 Estado del arte	8
1.3 Marco teórico	16
1.3.1 Energía requerida para llevar acabo la fusión del material.....	16
1.3.2 Análisis de pérdidas del sistema.....	16
1.3.3 Ley de Ohm	17
1.3.4 Ley de Joule	17
1.3.5 Cálculo del diámetro del hilo de la resistencia.....	18
1.3.6 Resistencias de Kanthal	18
1.3.7 Sistemas de control	19
1.3.8 Caudal del flujo de líquidos.....	20
1.3.9 Número de Reynolds	20
1.3.10 Variación de la velocidad de rotación de la bomba	21
1.3.11 Mecanismos de transmisión de movimiento.....	21
CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25

2.1.	Especificaciones de diseño	26
2.1.1.	Sistema de calentamiento	26
2.1.2.	Sistema de enfriamiento	27
2.1.3.	Sistema de movimiento	28
2.1.4.	Sistema eléctrico y electrónico	29
2.1.5.	Resumen	30
CAPÍTULO 3. DISEÑO.....		33
3.1.	Sistema de calentamiento	34
3.1.1.	Elementos que componen el sistema	34
3.1.2.	Ensamblaje de sistema de calentamiento	37
3.1.3.	Energía requerida para llevar a cabo la fusión del material.....	38
3.1.4.	Análisis de pérdidas del sistema.....	39
3.1.5.	Parámetros eléctricos del sistema	42
3.1.6.	Simulación de sistema de calentamiento.....	44
3.1.7.	Elemento de medición	46
3.2.	Sistema de enfriamiento.....	47
3.2.1.	Dimensionamiento y material de la estructura.....	47
3.2.2.	Cálculos de flujo	48
3.2.3.	Simulación de sistema de enfriamiento	50
3.2.4.	Sello mecánico y barra guía	51
3.3.	Sistema de movimiento	53
3.3.1.	Reductor de velocidad	53
3.3.2.	Diseño de transmisión mecánica	57
3.3.3.	Simulación mecánica.....	60
3.4.	Estructura y sistema acoplado	62
3.5.	Elementos y estructura de la interfaz	64
3.6.	Diseño de circuitos eléctricos y electrónicos	65
3.6.1.	Sistema de calentamiento	65
3.6.2.	Sistema de enfriamiento	68
3.6.3.	Sistema de movimiento	70
3.6.4.	Sistema de alimentación.....	70
CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....		73
4.1.	Selección final y cotización de componentes principales	74
4.2.	Sistema eléctrico y electrónico.....	77
4.3.	Construcción de estructura	81
4.4.	Sistema de calentamiento	83
4.5.	Sistema de enfriamiento.....	87

4.6. Sistema mecánico	89
4.6.1. Barra guía	89
4.6.2. Polea roscada.....	89
4.6.3. Ejes de transmisión	90
4.6.4. Paredes laterales de la caja de transmisión	92
4.6.5. Ensamble de caja de transmisión mecánica.....	93
4.7. Acoplamiento de sistemas	94
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS	95
5.1. Pruebas preliminares y ajuste del sistema.....	96
5.1.1. Prueba del sistema de calentamiento	96
5.1.2. Prueba de sistema de enfriamiento.....	97
5.1.3. Prueba del sistema mecánico	98
5.2. Validación de resultados	100
5.2.1. Metodología experimental	100
5.2.2. Resultados.....	101
5.2.3. Análisis térmico.....	102
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.....	105
6.1. Conclusiones	106
6.2. Trabajo a futuro.....	108
FUENTES DE CONSULTA	109
APÉNDICES.....	112
Apéndice 1. Factor de resistividad del Kanthal A-1	112
Apéndice 2. Carga específica máxima de resistencias.....	112
Apéndice 3. calibres de alambre estadounidense (awg)	113
Apéndice 4. Tipo de termopares.....	114
Apéndice 5. Calibres de alambre de termopares.....	115
ANEXOS	116
Anexo 1. Recomendaciones de uso	116
Anexo 2. Códigos G.....	117
Pared lateral 1 del sistema de transmisión mecánica	117
Pared lateral 2 del sistema de transmisión mecánica	118
Pared lateral 3 del sistema de transmisión mecánica	119
Pared lateral 4 del sistema de transmisión mecánica	120
Anexo 3. Planos de piezas y ensambles	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Microestructuras longitudinales de Al-4.5% wt.% Cu a varias velocidades de crecimiento: (a) 50 $\mu\text{m/s}$, (b) 100 $\mu\text{m/s}$, (c) 200 $\mu\text{m/s}$, (d) 500 $\mu\text{m/s}$, (e) 1000 $\mu\text{m/s}$, (f) 1500 $\mu\text{m/s}$ y (g) 2000 $\mu\text{m/s}$ [9].	4
Figura 2. Esquema de un horno Bridgman vertical [12].	6
Figura 3. Esquema de transferencia de calor en un sistema Bridgman (a) ideal, (b) real convexo y (c) real cóncavo [13].	7
Figura 4. Sistema de movimiento y prototipo [14].	8
Figura 5. Vista transversal del horno [15].	9
Figura 6. Sistema de solidificación unidireccional del tipo Bridgman [2].	10
Figura 7. Esquema de la unidad de solidificación direccional Bridgman [16].	11
Figura 8. Esquema del horno de solidificación Bridgman [9].	12
Figura 9. Ilustración de la estación de crecimiento de múltiples ampollas y el recipiente de ampolla [17].	13
Figura 10. Diagrama de la configuración vertical de Bridgman modificado [4].	14
Figura 11. Horno Bridgman para crecimiento de cristales [3].	15
Figura 12. Sistema de control de temperatura [24].	19
Figura 13. Transmisión de movimiento mediante engranes rectos [27].	22
Figura 14. Mecanismo sinfín-piñón [27].	23
Figura 15. Mecanismos tambor [29].	24
Figura 16. Dimensiones del crisol de grafito.	35
Figura 17. Croquis para la determinación del arreglo hexagonal de ladrillos.	36
Figura 18. Vistas a) de sección lateral y b) de sección superior del ensamblaje básico del horno.	38
Figura 19. Esquema de la distribución de las paredes internas.	40
Figura 20. Esquema de las paredes internas del sistema de calentamiento.	40
Figura 21. Esquema de la distribución de las paredes externas.	41
Figura 22. Esquema de las paredes externas del sistema de calentamiento.	41
Figura 23. Simulación térmica en SolidWorks® en la cual la muestra alcanza los 800°C.	45
Figura 24. Curva de temperatura contra tiempo de la muestra para una potencia de 370 W.	46
Figura 25. Contenedor de agua para el sistema de enfriamiento en vista: a) frontal b) isométrico.	48
Figura 26. Esquema del contenedor.	49
Figura 27. Simulación con caudal regulado para laminar.	51
Figura 28. Diseño CAD de sello mecánico: (a) vista isométrica (b) vista seccionada.	52
Figura 29. Motor Bringsmart JGY-2430, 12V, con reducción incluida, 3 rev/min.	54
Figura 30. Tornillo sinfín y corona comercial.	55

Figura 31. Engranajes obtenidos comercialmente de 64 y 17 dientes.	56
Figura 32. Diseño en CAD de la polea roscada: (a) Vista lateral (b) Vista seccionada lateral.	56
Figura 33. Medidas principales de la estructura del primer eje de transmisión.	57
Figura 34. Medidas principales de la estructura del segundo eje de transmisión	58
Figura 35. Vistas principales de las caras del soporte del sistema de transmisión de movimiento.	59
Figura 36. Ensamble de las paredes laterales del sistema de transmisión de movimiento.	59
Figura 37. Vistas (a) superior, (b) inferior, e (c) isométrica del ensamble del sistema de transmisión de movimiento.	60
Figura 38. Gráfico obtenido del estudio de movimiento en SolidWorks® del comportamiento de la velocidad angular en la polea.	61
Figura 39. a) Esqueleto de estructura completa b) Sistema Bridgman acoplado.	63
Figura 40. Interfaz gráfica en LabVIEW®.	64
Figura 41. Diagrama del sistema de control para el sistema térmico.	66
Figura 42. Diagrama eléctrico del control de temperatura.	66
Figura 43. Esquema del módulo Max 6675.	67
Figura 44. Conexión entre un Arduino® Mega y el módulo Max 6675.	68
Figura 45. Conexión entre la bomba de agua y Arduino® Mega.	69
Figura 46. Conexión entre el motor de corriente directa y Arduino® Mega.	70
Figura 47. Esquema de la alimentación trifásica a los sistemas.	71
Figura 48. Circuito eléctrico de alimentación y protección del sistema.	72
Figura 49. Conexión del sistema eléctrico: a) Conexiones entre los componentes y b) distribución de los componentes.	77
Figura 50. Conexión final entre Arduino® Mega y dos módulos MAX 6675.	78
Figura 51. Conexión final entre Arduino® Mega y la bomba de agua Yosoo. ...	79
Figura 52. Conexión final entre Arduino® Mega y el motor JGY-2430.	79
Figura 53. Esquema de conexión de la fuente de alimentación conmutada. ...	79
Figura 54. Caja de control: (a) vista isométrica y (b) vista inferior.	80
Figura 55. Corte de perfil tubular.	81
Figura 56. Realización del proceso de soldadura en el perfil tubular.	81
Figura 57. Estructura soldada y pulida.	82
Figura 58. Configuración octagonal de la pared de ladrillos.	83
Figura 59. Ladrillos refractarios cortados y ranurados.	84
Figura 60. Pared de ladrillos fijada con mortero y alambre recocido.	84
Figura 61. Resistencia dentro de las ranuras del horno.	85
Figura 62. Paredes del sistema de calentamiento: a) Paredes internas y externas b) Paredes internas.	86

Figura 63. Bloque cerámico de la resistencia.....	86
Figura 64. Ensamble de las paredes de acrílico.....	87
Figura 65. Sello mecánico impreso en PLA.....	88
Figura 66. Conexión entre el bidón y el recipiente de acrílico.	88
Figura 67. Barra guía: (a) Diagrama de medidas de la rosca externa, (b) producto final.....	89
Figura 68. Polea roscada.	90
Figura 69. Ensamble de elementos del primer eje de transmisión.	91
Figura 70. Ensamble de elementos del segundo eje de transmisión.	91
Figura 71. Fresado de paredes laterales: (a) fresado cilíndrico (b) fresado frontal de superficie.	92
Figura 72. Paredes laterales del sistema de transmisión mecánica.....	93
Figura 73. Ensamble de sistema de transmisión mecánica.	93
Figura 74. Acoplamiento final de todos los componentes de la estructura.....	94
Figura 75. Prueba de funcionamiento del controlador.....	96
Figura 76. Prueba de calentamiento en el horno a 800 °C: (a) vista superior del horno en funcionamiento, (b) ajuste y estabilización de la temperatura programada en el controlador.	97
Figura 77. Curva de caracterización de la bomba de agua Yosoo.....	98
Figura 78. Curva de caracterización del motor JGY-2430.....	99
Figura 79. Microestructura de la muestra de Zinalco. Aumento de 100X: (a) Metal base y (b) Muestra solidificada direccionalmente.....	101
Figura 80. Microestructura de la muestra solidificada direccionalmente. Aumento de 100X.....	102
Figura 81. Curva de enfriamiento de la aleación zinalco solidificada en Bridgman	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos de crecimiento de monocristales a partir de la fase [7].	3
Tabla 2. Condiciones de crecimiento a partir del material [7].	6
Tabla 3. Tabla morfológica del sistema de calentamiento.	30
Tabla 4. Tabla morfológica del sistema de enfriamiento.	30
Tabla 5. Tabla morfológica del sistema de movimiento.	31
Tabla 6. Propiedades físicas de los materiales a fundir.	38
Tabla 7. Calor y potencia necesarios para llevar los materiales a 800 °C.	39
Tabla 8. Materiales del horno y propiedades térmicas.	44
Tabla 9. Pines referentes a la comunicación SPI de Arduino®.	67
Tabla 10. Pines del módulo Monster Moto Shield.	69
Tabla 11. Selección y cotización de componentes comerciales.	74
Tabla 12. Rangos de velocidad lineal de la muestra.	99

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años, a pesar de los considerables avances en el conocimiento y desarrollo de nuevos materiales, existe un permanente desafío tecnológico que requiere de materiales más sofisticados y especializados. Así mismo, se sabe que las propiedades de los materiales dependen de su microestructura, la cual, a su vez, se encuentra sujeta a las condiciones en que los materiales son producidos, o tratados térmicamente [1].

Existen ciertos tipos de materiales, que en su solidificación pueden adquirir estructuras cristalinas, y a su vez, pueden ser preparados para adquirir un acomodo atómico perfecto (sin interrupciones) a lo largo de toda la muestra, llamados monocristales, los cuales, han adquirido una gran importancia en la tecnología moderna, sobre todo en la microelectrónica, que emplea monocristales de silicio y otros semiconductores. De ahí que los métodos de obtención y producción de éstos se hayan desarrollado en abundancia a pesar de que, por lo general, son procesos complicados, ya que el medio debe ser controlado adecuadamente [1].

Uno de los métodos más comunes y utilizados es el de Bridgman, el cual consiste en una solidificación direccional controlada del material, a través de un mecanismo con velocidades de trabajo bajas del orden de micrómetros por segundo. Este tipo de solidificación es una técnica muy importante para el estudio de distintas microestructuras con diferentes parámetros en el proceso de solidificación [2], y su rango de aplicación se encuentra desde la producción de pequeños cristales en laboratorios para la investigación de propiedades físicas, hasta la manufactura de grandes monocristales en aplicaciones industriales [3].

En el presente trabajo se describe la realización de un sistema semiautomático de solidificación unidireccional tipo Bridgman, el cual sea utilizado para el desarrollo de trabajos de investigación de ciencia básica y aplicada de materiales en las áreas de metalúrgica y mecatrónica dentro de la UPIIZ.

En un inicio, se propone que este sistema esté constituido por tres sistemas principales para el proceso de solidificación:

- Sistema de calentamiento. Consta de un horno capaz de alcanzar una temperatura máxima de 800 °C, el cual se utiliza para la fundición de muestras con puntos de fusión menores a este rango.
- Sistema de enfriamiento. Consta de un sistema de un flujo hidráulico laminar regulable, ubicado después del sistema de calentamiento, el cual mantiene la temperatura para el enfriamiento la muestra, lo que favorece su solidificación unidireccional.
- Sistema de movimiento. Consta de la regulación de velocidad de un motor, el cual se acopla a una transmisión para la reducción de movimiento rotacional y su conversión a movimiento lineal para el traslado de la muestra a lo largo de los sistemas de calentamiento y enfriamiento, teniendo una velocidad final mínima lineal de 10 $\mu\text{m/s}$.

A su vez, se plantea el uso de una interfaz hombre-máquina, a través de la cual, puedan ser introducidos los parámetros iniciales para el funcionamiento del sistema conforme a lo requerido por el usuario, como lo es, la velocidad de desplazamiento de la muestra, el flujo hidráulico para el sistema de enfriamiento, así como la temperatura deseada dentro del horno. Por otra parte, se propone la realización de mediciones periódicas de la temperatura de la muestra en un punto específico, con el fin de obtener su curva de solidificación a lo largo del proceso.

En el Capítulo 1 se realiza una revisión bibliográfica con el fin de desarrollar las generalidades y el marco teórico que permiten sustentar el trabajo propuesto, así mismo, se aborda un estado del arte de los trabajos similares realizados en los últimos años enmarcando los objetivos para el desarrollo de este proyecto.

Posteriormente, en el Capítulo 2 se muestra el planteamiento del problema, realizando las especificaciones generales para el diseño de cada uno de los sistemas principales del proyecto. A continuación, en el Capítulo 3 se aborda la etapa de diseño, en la cual se realiza un análisis de cada uno de los sistemas principales, de forma que se justifique el cumplimiento de los objetivos y de la funcionalidad del proyecto previo a su construcción e implementación. En el Capítulo 4 se presentan las etapas de construcción del proyecto, así como su implementación en conjunto. En el Capítulo 5 se describe el desarrollo para la preparación de la solidificación direccional de muestras haciendo uso del sistema construido, se aborda su análisis microestructural y la validación de los resultados obtenidos. Finalmente, en el Capítulo 6 se desarrollan las conclusiones del proyecto así como el trabajo futuro a realizar sobre este sistema.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sistema semiautomático de solidificación unidireccional para el crecimiento de monocristales por el método de Bridgman, capaz de monitorear y controlar los parámetros de temperatura de calentamiento y velocidad de movimiento del material a lo largo del proceso, conforme a lo establecido por el usuario a través de una interfaz hombre-máquina.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar las simulaciones computacionales necesarias para el diseño y validación de las distintas etapas que conformen el sistema.
- Implementar un sistema de refrigeración hidráulico de flujo laminar regulable, el cual mantenga la temperatura para el enfriamiento y solidificación de la muestra.
- Implementar un sistema de transmisión de movimiento para la reducción de movimiento rotacional de un motor y su conversión a movimiento lineal para el traslado del crisol que contendrá la muestra, teniendo una velocidad final mínima de desplazamiento de 10 $\mu\text{m/s}$.
- Implementar un sistema de calentamiento para la fundición de la muestra capaz de alcanzar una temperatura máxima de 800 °C.
- Implementar una interfaz hombre - máquina para la modificación y ajuste de los parámetros iniciales del sistema, como la temperatura de calentamiento, la velocidad de desplazamiento lineal de la muestra, y la velocidad angular de la bomba para el flujo de agua dentro del sistema de enfriamiento.
- Implementar un sistema de monitoreo para la obtención de la temperatura de un punto de la muestra a lo largo del proceso de solidificación.
- Implementar los sistemas de monitoreo y control para los sistemas de calentamiento y de movimiento lineal de la muestra.

- Diseñar los circuitos eléctricos necesarios para las etapas de potencia, de acondicionamiento de sensores y de acoplamiento del dispositivo de control electrónico.
- Diseñar y construir la estructura en la que se acoplen todas las partes del sistema de solidificación unidireccional.
- Obtener muestras solidificadas a través de este sistema con el fin de corroborar su adecuado funcionamiento.

JUSTIFICACIÓN

En el presente trabajo se propone la realización de un sistema semiautomático de solidificación unidireccional tipo Bridgman, el cual será de utilidad para el tratamiento y estudio de materiales, así como una herramienta para el desarrollo de trabajos didácticos y de investigación.

Por su parte, existen hornos Bridgman comerciales que ofrecen algunas empresas con fines de investigación. Un ejemplo de estas es la empresa Zhengzhou CY Scientific Instrument Co., Ltd., la cual tiene en venta hornos de crecimiento de cristales Bridgman compactos con costos entre los US\$10,000 y US\$11,000. Estos sistemas resultan ser por lo regular caros debido a que cuentan con dispositivos y sistemas de alta calidad y precisión, cámaras de vacío para el mejor control de los parámetros, así como altos rangos de temperaturas de operación, que pueden llegar hasta 1700°C. Por otro lado, no existe una empresa mexicana dedicada a la realización y venta de este tipo de dispositivos, por lo que su adquisición en el país implica complicaciones para su transporte, lo que hace que el costo total del producto sea aún mayor.

En este caso, se opta por la construcción de este sistema, complementándolo únicamente con características útiles necesarias para el desarrollo de investigaciones y desarrollo de ciencia básica dentro de las áreas de metalúrgica y mecatrónica, lo cual supone la reducción considerable del costo del producto, a aproximadamente MXN\$12,000 o bien, US\$636 según lo estimado a finales del año 2017 (y abordado en la sección 4.1 de selección de componentes comerciales).

Cabe decir que el proyecto es realizado con el fin de estudiar el efecto de las condiciones del sistema (como son la velocidad de avance, temperatura de fundición) sobre los parámetros microestructurales de las muestras solidificadas (morfologías, espaciamentos dendríticos, radios de las puntas de las dendritas y distribución de soluto, entre otros), con lo que, principalmente, el objetivo de este sistema es el desarrollo de ciencia básica en el área de materiales, y que estos resultados posteriormente sean desarrollados en ciencias aplicadas.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES RELEVANTES

1.1 GENERALIDADES

1.1.1 Monocristales

Cuando la disposición atómica de un sólido cristalino es perfecta, sin interrupciones, a lo largo de toda la muestra, el resultado es un monocristal. Todas las celdillas unidad están entrelazadas o unidas del mismo modo y tienen la misma dirección. Los monocristales existen en la naturaleza, pero también se pueden generar artificialmente. El crecimiento de los monocristales es por lo general difícil, ya que el medio se debe controlar cuidadosamente [1].

Los cristales son los pilares no reconocidos de la tecnología moderna. El desarrollo tecnológico moderno depende en gran medida de la disponibilidad de monocristales adecuados, ya sea para láseres, semiconductores, dispositivos magnéticos, dispositivos ópticos, superconductores, telecomunicaciones, etc. El crecimiento de monocristales se ha desarrollado a lo largo de los años para satisfacer las necesidades de investigación básica y aplicaciones [4].

1.1.2 Solidificación de monocristales

Para el crecimiento de los monocristales, la solidificación debe tener lugar alrededor de un único núcleo, de modo que no crezca ningún otro cristal. Para lograrlo, la temperatura de la interfase sólido-líquido debe ser ligeramente inferior a la temperatura de fusión del sólido, y la temperatura de líquido tiene que superar la de la interfase. Para conseguir este gradiente de temperaturas, el calor latente de solidificación debe conducirse a través del cristal que se está solidificando. La velocidad de crecimiento del cristal deberá ser lenta para que la temperatura de la interfase sólido-líquido esté ligeramente por debajo del punto de fusión del sólido que se está solidificando [5].

Se dispone en forma continua de metal fundido en los vertederos para impedir que se formen rechupes durante la solidificación. El término solidificación direccional se utiliza para describir este aspecto del proceso de solidificación y los métodos con los que se controla [6].

Existen diversos métodos de crecimiento de monocristales. Se clasifican principalmente por: crecimiento a partir de la fase líquida, a partir de la fase gaseosa y a partir de la fase sólida [7].

Algunos de los métodos de crecimiento de monocristales se clasifican a partir de la fase en la Tabla 1.

Tabla 1. Métodos de crecimiento de monocristales a partir de la fase [7].

Fase Gaseosa	Fase Líquida		Fase Sólida
	Con crisol	Sin crisol	
PVT (Transporte físico)	Bridgman	Zona Flotante	Recristalización
CVT (Transporte químico)	Czochralski	Flujo Hidrotermal	
	Disolución THM	Verneuil Skull	

Los métodos que parten de la fase líquida son favorables para obtener cristales grandes y de muy buenas características, pues el crecimiento se lleva a cabo mediante el enfriamiento controlado de la muestra. Dentro de estos métodos destacan las técnicas de Bridgman-Stockbarger y la de Czochralski. El método Bridgman-Stockbarger es el proceso más favorable para el crecimiento de cristales, ya que se puede ajustar el gradiente de temperatura independientemente de la posición de la interfase [8].

1.1.3 Velocidades de crecimiento

El crecimiento de monocristales por el método de Bridgman tiene la característica de poder modificar la microestructura de los materiales variando la velocidad de crecimiento del monocristal, obteniendo así diferentes tamaños, formas y orientaciones dentro de la microestructura.

La Figura 1 muestra las microestructuras longitudinales de una aleación aluminio-cobre solidificada direccionalmente a velocidades de crecimiento de 50, 100, 200, 500, 1,000, 1,500 y 2,000 $\mu\text{m/s}$. Como se puede ver, en la Figura 1(a), la estructura de solidificación a la velocidad de crecimiento de 50 $\mu\text{m/s}$ se compone enteramente de dendritas columnares regulares. Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad de crecimiento, un gran número de dendritas gemelas comienzan a aparecer. Cabe destacar que, en las microestructuras no homogéneas a velocidades de crecimiento de 100 (Figura 1(b)), 200 (Figura 1(c)) y 500 $\mu\text{m/s}$ (Figura 1(d)), el crecimiento de dendritas gemelas se presenta relativamente aislado y desordenado. Cuando esta desorientación es relativamente grande, por ejemplo: T1, T3, T4, T5 y T6, mostrados en la Figura 1, los brazos secundarios más consistentes con el gradiente térmico G crecen más rápidamente, mientras que el otro lado es parcialmente inhibido. A 1,000 $\mu\text{m/s}$ (Figura 1(e)), se muestra una secuencia de laminillas alternadas gemelas y no centrifugadas, la apariencia habitual para el crecimiento germinado, emerge de las dendritas columnares regulares con cierto ángulo con respecto a G .

Cuando las velocidades de crecimiento aumentan a 1,500 y 2,000 $\mu\text{m/s}$ (Figura 1(d) y 1(e)), las dendritas gemelas más finas presentan una secuencia de láminas más ordenada y sobrecargan granos columnares regulares con una clara ventaja de crecimiento. A la velocidad de crecimiento de 2,000 $\mu\text{m/s}$, se obtiene una microestructura de solidificación compuesta casi enteramente de dendritas gemelas, con dirección de crecimiento casi paralela a G. Se puede observar que la mayor parte de la sección presenta dendritas gemelas compactas y uniformes, y sólo existen unas pocas dendritas equiaxiales columnares regulares y pequeñas en los bordes [9].

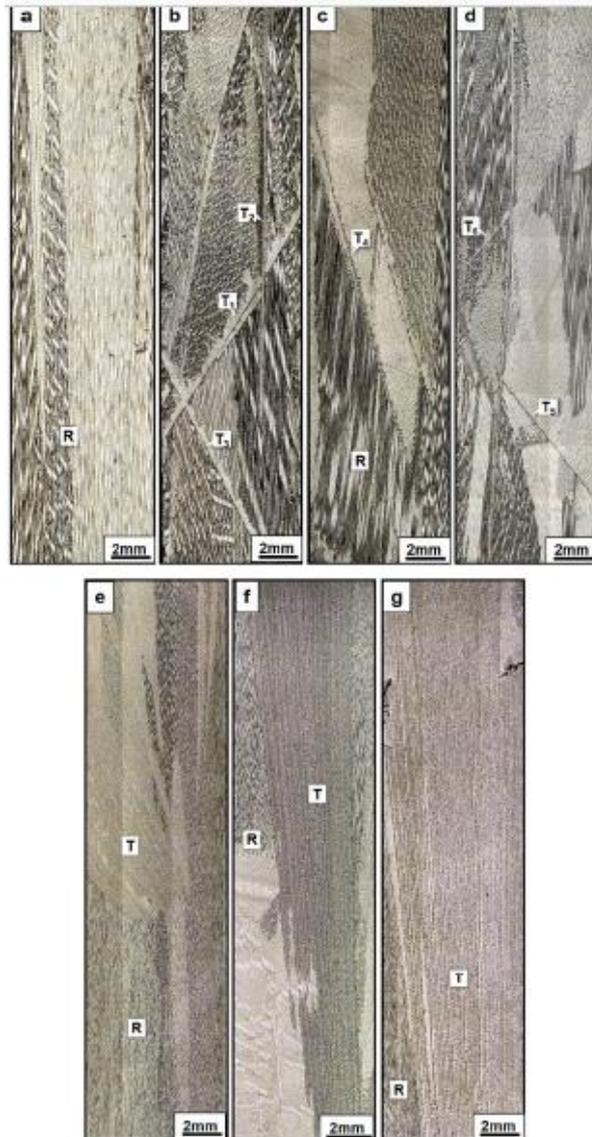


Figura 1. Microestructuras longitudinales de Al-4.5% wt.% Cu a varias velocidades de crecimiento: (a) 50 $\mu\text{m/s}$, (b) 100 $\mu\text{m/s}$, (c) 200 $\mu\text{m/s}$, (d) 500 $\mu\text{m/s}$, (e) 1000 $\mu\text{m/s}$, (f) 1500 $\mu\text{m/s}$ y (g) 2000 $\mu\text{m/s}$ [9].

1.1.4 Método de Bridgman

El horno de Bridgman toma su nombre del físico ganador del premio Nobel en 1946; Percy W. Bridgman. En la década de 1920, Bridgman desarrolló una técnica de bajar un crisol cilíndrico a una velocidad fija a lo largo del eje de un horno tubular vertical, mantenido a una temperatura fija, para producir materiales monocristales. Esta técnica fue modificada más adelante por Donald C. Stockbarger en los años 30 para producir monocristales grandes de fluoruro de litio, donde un gradiente de alta temperatura era requerido para el crecimiento acertado. El procedimiento de solidificación resultante se conoce como técnica Bridgman-Stockbarger, solidificación Bridgman o el método Bridgman. El método es ampliamente utilizado en la investigación y la industria [10].

En la técnica de crecimiento de Bridgman, se introduce un crisol que contiene una alimentación policristalina en un horno de gradiente. Después de la fusión de la alimentación, el crecimiento se inicia por un desplazamiento impuesto de las isoterms. Esto puede hacerse moviendo el crisol o la unidad térmica, y también programando el enfriamiento de las diversas partes del horno, permaneciendo todo estático. Con respecto a la gravedad, el aparato (o bien puede estar alineado (configuración vertical) o perpendicular (configuración horizontal). La configuración vertical es la más utilizada debido a que limita las fuerzas motrices de flotabilidad térmica, preserva en principio la simetría rotacional de los cristales producidos y es generalmente estable. El método de Bridgman horizontal se limita a cristales específicos de alta calidad [11].

El método de Bridgman está compuesto de tres partes: Un sistema de calentamiento, un sistema de enfriamiento y un sistema de movimiento. El sistema de calentamiento consiste en un horno con una capacidad de temperatura dependiendo del material a estudiar, haciendo uso de un crisol encargado de almacenar el material fundido. El sistema de enfriamiento consiste en un recipiente o zona que posee una entrada y salida de agua, aire, u otro método de enfriamiento, donde también es utilizado un aislante térmico entre la zona de calentamiento y enfriamiento para proteger al sistema de enfriamiento del calor excesivo del horno. El sistema de movimiento permite desplazar el crisol desde el sistema de calentamiento hacia el sistema de enfriamiento, donde la velocidad mínima de movimiento puede ser del orden de los $\mu\text{m/s}$ [2].

Las condiciones de crecimiento dependen del material a crecer. El tipo de crisol, la velocidad de desplazamiento y los requerimientos de temperatura se verán relacionados a la aleación o material a tratar. En la Tabla 2 se muestran algunos ejemplos.

Tabla 2. Condiciones de crecimiento a partir del material [7].

	Punto de fusión (°C)	Velocidad (mm/h)	Crisol
Al ₂ O ₃	2,037	2-8	Molibdeno
FeAl ₂ O ₃	1,79	5-10	Iridio
Cu	1,083	6-60	Grafito
NaNO ₂	271	3-6	Teflón

En la Figura 2 se muestra un esquema de un horno Bridgman en configuración vertical. En la parte superior se puede observar el sistema de calentamiento, donde se encuentra la muestra de la aleación dentro de un crisol, un calentador externo y los termopares. En la parte inferior se puede observar un sistema de enfriamiento, donde la muestra es introducida dentro de algún líquido refrigerante. Se observa que entre el sistema de calentamiento y enfriamiento se encuentra un aislante térmico que evita que el calor sea transmitido hacia el sistema de enfriamiento. Por último, se indica el desplazamiento de la muestra hacia el sistema de enfriamiento llevado a cabo por el sistema de movimiento.

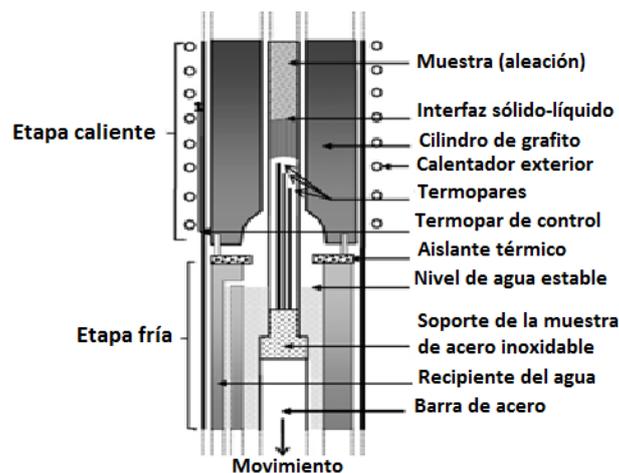


Figura 2. Esquema de un horno Bridgman vertical [12].

En el diseño tradicional del sistema de Bridgman, el horno consta de tres regiones: una zona caliente a una temperatura por encima del punto de fusión, una zona fría a una temperatura por debajo del punto de fusión y una zona de "gradiente" entre ellas. La noción idealizada clásica de tal disposición es que, dentro de la zona de gradiente, el calor fluiría predominantemente en la dirección axial, como se indica en la Figura 3(a). Una representación más exacta de los flujos de calor en el sistema se muestra en la Figura 3(b) y 3(c), donde el calor entra desde una zona caliente en el líquido y sale hacia la zona fría que rodea al

crystal solidificado. Esta figura también muestra que, para la misma configuración de flujo térmico, la interfaz podría adoptar una forma convexa (Figura 3(b)) o cóncava (Figura 3(c)), dependiendo de su posición dentro del horno [13].

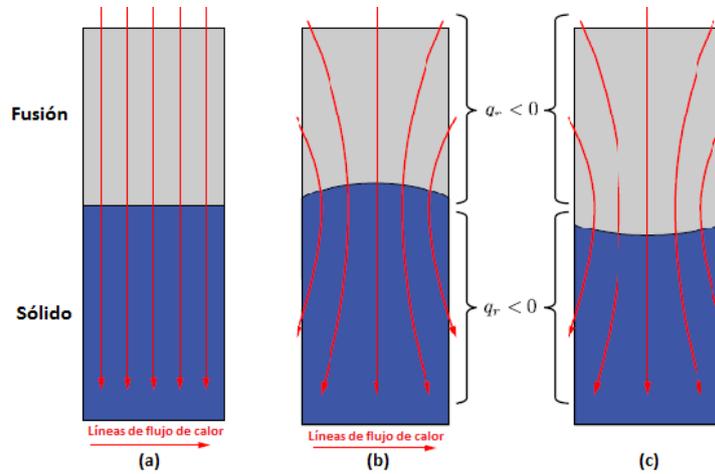


Figura 3. Esquema de transferencia de calor en un sistema Bridgman (a) ideal, (b) real convexo y (c) real cóncavo [13].

1.2 ESTADO DEL ARTE

El método de Bridgman es uno de los métodos más sencillos para formar un monocristal, así como uno de los más económicos y un horno fácil de utilizar, por lo que actualmente es uno de los métodos más utilizados dentro de este campo.

En la Universidad Estatal de Iowa (en inglés, Iowa State University; ISU) se tiene registro de un reporte de investigación y desarrollo sobre un “Aparato Bridgman para crecimiento de monocristales de bajo costo”. Los monocristales fabricados en esta máquina son de zinc, plomo, estaño y cloruro de plata, con dimensiones de 9.525 y 19.05 milímetros y longitudes de 88.9 milímetros. Los crisoles utilizados fueron de cuarzo y de grafito. La temperatura máxima es de 850 °C. Para el sistema de movimiento se hace uso de un motor de inducción, modificando su velocidad por medio de un variador de velocidad y un reductor de engranajes, y se hace uso de una polea con una cadena unida al eje de salida del reductor para soportar la muestra y bajarla a través del horno de acuerdo con la velocidad ajustada en el cambiador de velocidad, donde la velocidad menor alcanzada fue de 68 $\mu\text{m}/\text{min}$. Para el sistema de calentamiento se hace uso de un núcleo de alúmina roscado enrollado con alambre de Kanthal A-1 calibre 20, y termopares, amperímetros e interruptores. Para el sistema de enfriamiento se usa una ligera cantidad de remoción de calor por convección vertical natural del aire a través del núcleo del horno, donde este aire más fresco fluye continuamente. El costo del horno fue de un aproximado de 500 dólares. En la Figura 4 se puede observar un esquema del sistema de movimiento y el prototipo [14].

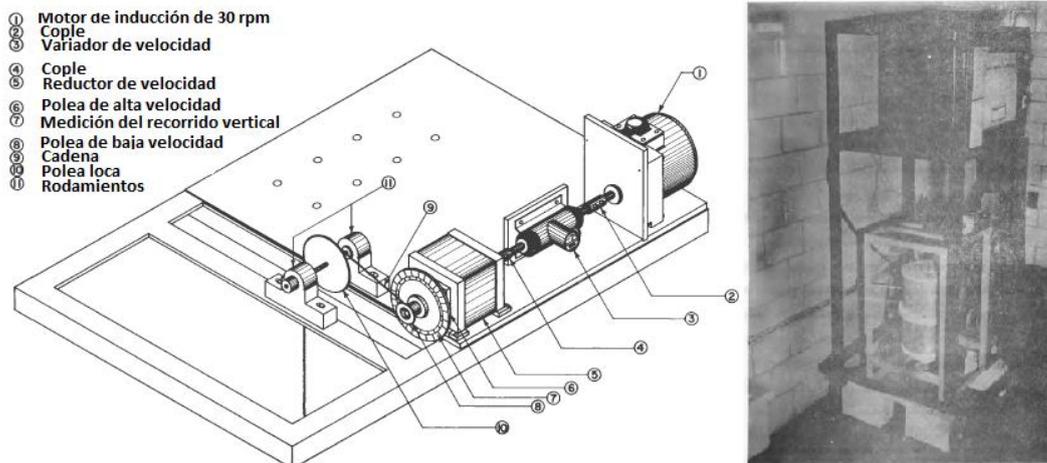


Figura 4. Sistema de movimiento y prototipo [14].

El Centro de Vuelo Espacial Marshall de la NASA concibió y financió el desarrollo del Horno de Solidificación Direccional Automatizada Avanzada (AADSF) el cual fue lanzado en la segunda misión de Estados Unidos de Carga Útil de

Microgravedad (USMP-2) a principios de 1994. El AADSF es un horno de crecimiento de monocristal Bridgman-Stockbarger diseñado para operar en un entorno de microgravedad en órbita y procesar principalmente aleaciones de Mercurio-Cadmio-Telurio. El sistema AADSF consta de tres componentes principales: El horno, el sistema DAS (Sistema de Adquisición de Datos) y el Sistema de Control y Acondicionamiento de la Señal (SCCS). El horno puede alcanzar temperaturas de hasta 1600°C. El diámetro del horno permite procesar diámetros de muestra de hasta 20 mm. El sistema de movimiento tira de la muestra a través de la zona de gradiente a velocidades controladas entre 0.5 y 50 milímetros por hora, donde la velocidad es seleccionada por el experimentador basándose en los parámetros esperados de crecimiento de los cristales. Se hace uso de una placa de extracción de calor en la zona de gradiente, la cual se encuentra en medio de dos aisladores térmicos de zirconia y alúmina densa de 7.6 mm y 4.4 mm para separar la placa de la zona caliente y la zona fría las cuales se requiere que posean una temperatura de 850 °C y 350 °C respectivamente. Se desarrolló un modelo térmico utilizando como herramienta el análisis de elemento finito por medio de diseño asistido por computadora (CAD, por su acrónimo en inglés Computer-Aided Design), con el fin de obtener parámetros para el diseño y para predecir el rendimiento del horno. Un recipiente de aparatos experimentales sellados proporciona una atmósfera de gas inerte para el horno y los subsistemas de telemetría de traducción de muestreo y experimento. En la Figura 5 se puede observar un esquema de la vista transversal del horno [15].

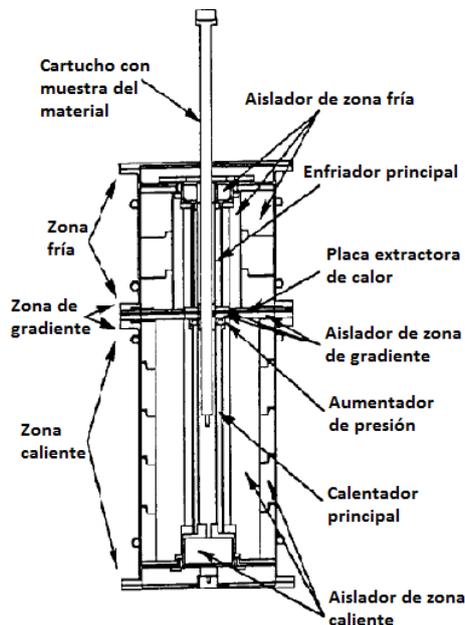


Figura 5. Vista transversal del horno [15].

El Dr. Miguel Ángel Suárez Rosales en su Tesis Doctoral sobre la “*Predicción de las microestructuras de solidificación y distribución de soluto en aleaciones ternarias. Teoría contra experimento*” realizó un Horno Bridgman para su desarrollo experimental. La máquina fue construida para el crecimiento de monocristales de aleaciones de aluminio, zinc y magnesio. Para el sistema de

calentamiento se hace uso de un horno de resistencia con una capacidad de 1,000 °C, regulando su temperatura con un par de controladores de temperatura Omron E5CN, la temperatura es monitoreada por termopares tipo K. El sistema de enfriamiento consiste en un recipiente de acrílico con una entrada y salida de agua, donde el flujo de agua es controlado midiendo el tiempo de llenado del recipiente. Entre el sistema de enfriamiento y calentamiento se encuentra una placa de cobre como aislante térmico que protege al sistema de enfriamiento del calor excesivo del horno, la cual es enfriada por el contacto con el agua manteniendo así su temperatura. El sistema de movimiento se encarga de desplazar la varilla que introduce un crisol de grafito del sistema de calentamiento hacia el agua del sistema de enfriamiento, donde el desplazamiento es llevado a cabo por un motor de 90 RPM, un sistema de poleas y un tornillo sinfín, los cuales en conjunto permiten modificar la velocidad de avance del crisol entre 1 $\mu\text{m/s}$ y 1 m/s. El crisol permite obtener muestras de 3 mm de diámetro. En la Figura 6 se puede observar el sistema de solidificación tipo Bridgman utilizado [2].



Figura 6. Sistema de solidificación unidireccional del tipo Bridgman [2].

En la Universidad Estatal de Iowa se tiene registro de una tesis de Maestría en Material elaborado por Erin Sunseri sobre “Orientación dendrítica en aleaciones de magnesio” en la cual realizó su desarrollo experimental usando el aparato Bridgman. La máquina consiste en una ampolla de alúmina centrada dentro de un horno en la parte superior y una cámara de líquido refrigerante de metal en la parte inferior que contiene la aleación eutéctica ternaria Indio-Galio-Estaño (Galinstano). El horno y la cámara refrigerante están asegurados a una estructura metálica, conocida como carro. El carro está unido a un eje roscado que está controlado por una correa conectada a un motor a pasos. Para todos los experimentos se utilizó una ampolla de alúmina de 5.5 mm de diámetro interior y 7 mm de diámetro exterior. Se utilizó un módulo de control de temperatura. Se permitió que un horno con capacidad máxima de 1000 °C se

calentara hasta 900 °C mientras se enfriaba una cámara de enfriamiento consistente en un baño de inmersión directa de metal mediante un flujo continuo de agua a 15 °C. Una pieza de roca de lava fabricada a medida creó una zona adiabática entre el horno y la cámara de enfriamiento. La ampolla de alúmina se evacuó y se rellenoó con una atmósfera de argón inerte para evitar la oxidación de la aleación. Un motor a pasos controlado por ordenador desplazó el carro hacia arriba a una velocidad predeterminada mientras la ampolla de muestra permaneció en una posición constante. La velocidad para todos los experimentos se estableció en 80 $\mu\text{m/s}$, ya que resultó ser ideal para la producción de dendritas. En la Figura 7 se puede observar un esquema de la unidad de solidificación direccional Bridgman [16].

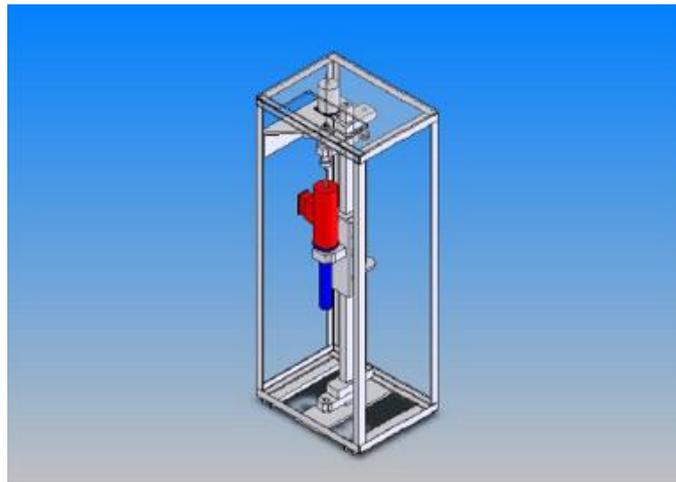


Figura 7. Esquema de la unidad de solidificación direccional Bridgman [16].

En la Universidad Politécnica del Noroeste de China se tiene registro de un artículo sobre el “Crecimiento de dendritas gemelas por el método de solidificación Bridgman”. Las dendritas gemelas fueron producidas en aleaciones aluminio-cobre, con muestras de 6.9 mm de diámetro y 110 mm de longitud, en un horno de inducción bajo una atmósfera de argón con capacidad de temperaturas de hasta los 900 °C. Se utilizó un enfriamiento por agua, la cual contenía galio, indio y estaño para alcanzar altas velocidades de extracción de calor. Después de calentar hasta 800 °C a una velocidad controlada y mantenerse térmicamente durante 20 min, las muestras se movieron hacia abajo en un baño de metal líquido a varias velocidades: 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500 y 2000 $\mu\text{m/s}$. La Figura 8 muestra un esquema del horno de solidificación Bridgman [9].

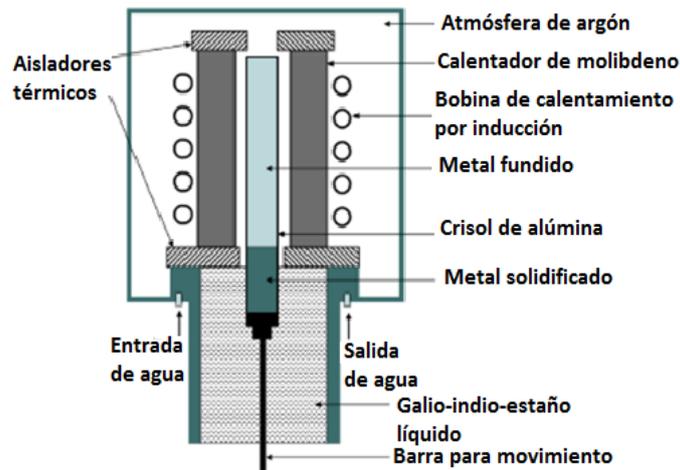


Figura 8. Esquema del horno de solidificación Bridgman [9].

En la Universidad de Tennessee en Estados Unidos se tiene registro de un artículo sobre el “Crecimiento Bridgman de múltiples ampollas de cristales de escintilador de haluro utilizando el método de auto-siembra” en el cual se investiga el crecimiento de múltiples ampollas a 25 mm de diámetro de monocristales de yoduro ternario. La máquina fue diseñada y construida utilizando materiales cerámicos ampliamente disponibles y componentes de grado industrial. El horno tiene una temperatura de funcionamiento máxima de 1,000 °C y se divide en dos zonas de calentamiento independientemente controladas separadas por una región aislada de 64 milímetros que aloja un diafragma. La construcción básica se compone principalmente de ladrillos refractarios sostenidos por una estructura de acero. El calentamiento se consigue mediante 12 elementos de barra de carburo de silicio fácilmente reemplazables con una región de calentamiento eficaz de 1,800 °C para coincidir con el orificio rectangular. El mecanismo de descenso de cristal, y cada zona de calentamiento se programa y funciona utilizando un controlador lógico y una interfaz gráfica de usuario. Para ayudar a monitorear los procesos de siembra y crecimiento, los termopares incrustados en cada recipiente de ampolla indican temperaturas en la semilla y regiones de congelación última de la carga. En la Figura 9 se muestra una ilustración de la estación de crecimiento de múltiples ampollas y el recipiente de ampolla [17].

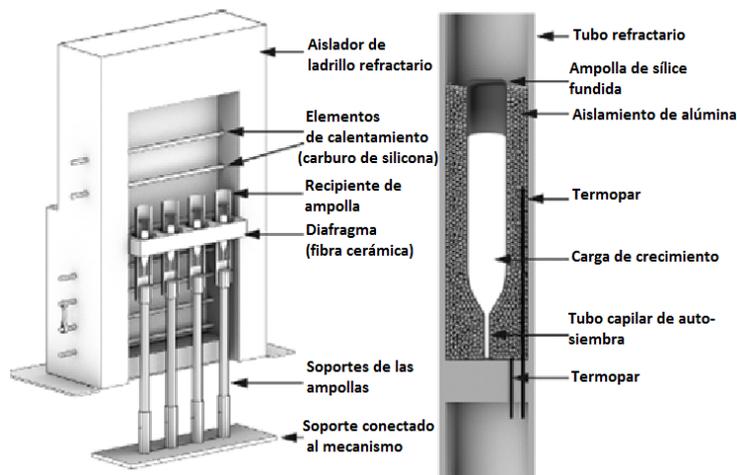


Figura 9. Ilustración de la estación de crecimiento de múltiples ampollas y el recipiente de ampolla [17].

En la Universidad de Anna en la India se tiene registro de una tesis doctoral en física sobre el “Crecimiento y caracterización de monocristales orgánicos mediante la técnica de Bridgman vertical modificada”. Para su desarrollo experimental es utilizado un horno Bridgman vertical para el crecimiento de monocristales de buena calidad y gran tamaño. Para la construcción del horno Bridgman se utilizaron dos tubos cilíndricos de vidrio. El horno se enrolló con un alambre kanthal A1 fino con espesor de 0.5 mm. La temperatura del horno se controló y mantuvo utilizando un controlador de temperatura acompañado de un tiristor de 10 A y 230 V. Se empleó un termopar cromo-alumel como sensor. La salida de corriente máxima del tiristor se fijó en 2 A. En el horno, se utilizó una velocidad de 10 mm/h mediante un motor a pasos. La translación lineal se logra acoplado directamente el eje giratorio del motor a pasos a la ampolla de crecimiento a través de una cuerda y polea. El naftaleno es un compuesto orgánico transparente con punto de fusión a 80 °C. En la Figura 10 se tienen los siguientes componentes: 1) Controlador del motor a pasos, 2) Motor a pasos, 3) Hilo, 4) Paño de cerámica, 5) Tubo exterior, 6) Tubo interior, 7) Alambre de Kanthal A1, 8) Termopar, 9) Ampolla y 10) Controlador de temperatura [4].

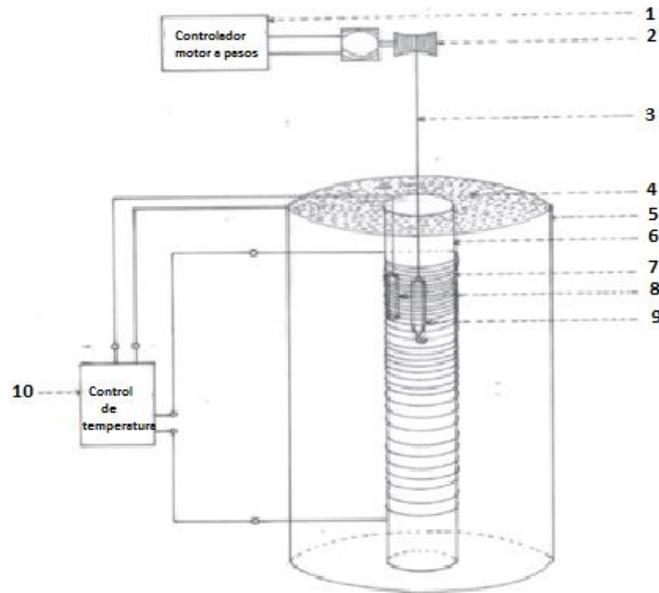


Figura 10. Diagrama de la configuración vertical de Bridgman modificado [4].

En la actualidad existen hornos Bridgman comerciales que ofrecen algunas empresas. Un ejemplo es la empresa Carbolite, la cual tiene más de tres décadas de experiencia en el desarrollo de dispositivos para el crecimiento de cristales. Sus hornos son fabricados en Alemania y Reino Unido. El dispositivo Bridgman vertical BV-HTRV 70-250 / 18 está diseñado con un horno tubular de una sola zona montado en la parte superior, el dispositivo de tracción está montado debajo del horno tubular. El tubo está equipado con bridas a prueba de vacío, y un eje enfriado por agua. Todos los movimientos se controlan a través de un potenciómetro. El controlador de programación regula la velocidad de tracción. Junto a la muestra se encuentra un termopar para una lectura precisa de la temperatura de la muestra. Tanto el termopar de muestra como de sonda están unidos al dispositivo de tracción inferior. El movimiento de la muestra puede ser rápido para carga y descarga o con una velocidad definida por el usuario para el crecimiento de cristales. Un tubo cerámico rodea el termopar de la sonda y la muestra. El funcionamiento de la unidad se puede lograr bajo condiciones de vacío. En la parte superior, el tubo se conecta a la bomba de vacío. La válvula hacia la línea de vacío se abre y se cierra manualmente. El nivel de vacío se controla mediante un medidor piezoeléctrico. Es posible conectar una computadora al sistema para registrar todos los datos relevantes del proceso. En la Figura 11 se muestra el Horno de Bridgman para crecimiento de monocristales de la empresa Carbolite [3].



Figura 11. Horno Bridgman para crecimiento de cristales [3].

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 Energía requerida para llevar a cabo la fusión del material

La energía necesaria para fundir cualquier metal puede simplificarse si se supone que su conductividad térmica no varía en cierto intervalo de temperaturas. Para el cálculo se toman en cuenta los diferentes calores específicos de los materiales a utilizar en sus diferentes estados, así como el calor latente de fusión requerido para cambiar de estado el material [18].

El calor necesario para fundir un material se puede determinar mediante:

$$Q = mC_p\Delta T \quad (1)$$

Se debe considerar de igual forma la energía requerida para cambiar de sólido a líquido, es decir, el calor latente, que se define como:

$$Q = mh \quad (2)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección y m la masa.

1.3.2 Análisis de pérdidas del sistema

El cálculo de la cantidad total suministrada al sistema en un horno, será igual a: la cantidad de calor necesario para el calentamiento de carga, más las pérdidas producidas durante el tiempo de operación de dicho horno [19]. Es decir:

$$Q_s = Q_p + Q_c \quad (3)$$

Donde:

Q_s = calor suministrado por el sistema.

Q_p = pérdidas de calor.

Q_c = calor absorbido por la carga.

La acumulación de calor en las paredes tendrá como efecto un consumo mayor de energía. Mediante un correcto aislamiento, las pérdidas de calor serán menores y por lo tanto se tendrá un menor consumo de energía [19].

De acuerdo con [20], se define a las pérdidas por calor de cilindros de capas múltiples como:

$$q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{2\pi L r_1 h_{ci}} + \frac{1}{2\pi L k_1} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2\pi L k_2} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{2\pi L r_3 h_{co}}} \quad (4)$$

Donde:

q = pérdidas de calor.

ΔT = diferencia de temperaturas entre las paredes extremas.

L = longitud del cilindro.

k = conductividad térmica de la capa de pared.

r = radios de las capas.

h = coeficiente de transferencia de calor por convección.

1.3.3 Ley de Ohm

De la Ley de Ohm se define la resistencia eléctrica como:

$$R = \frac{V}{I} \quad (5)$$

Donde:

R = resistencia eléctrica (Ω).

V = voltaje (V).

I = corriente (A).

Otra expresión de la resistencia se define de igual forma como:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (6)$$

Donde:

ρ = resistividad ($\Omega \cdot m$).

l = longitud (m).

A = área de la sección transversal (m^2).

Por otra parte:

$$P = V * I \quad (7)$$

Donde:

P = potencia eléctrica (W).

1.3.4 Ley de Joule

La Ley de Joule nos permite calcular la cantidad de calor que se genera cuando una corriente eléctrica circula por una resistencia eléctrica. El calor Q que se

libera en la resistencia debe ser igual a la energía que le suministró la fuente de fuerza electromotriz [21]. Se define como:

$$Q = P * t = I^2 R t = \frac{V^2}{R} t = V I t \quad (8)$$

Donde:

Q = calor disipado por la resistencia (J).

I = corriente eléctrica (A).

R = resistencia eléctrica (Ω).

T = tiempo que circula la corriente por la resistencia (s).

1.3.5 Cálculo del diámetro del hilo de la resistencia

Se define un diámetro propuesto del hilo de la resistencia eléctrica como [19]:

$$d = \sqrt[3]{\left(\frac{P}{V}\right)^2 \left(\frac{\rho C_t}{p}\right)} \quad (9)$$

Donde:

d = diámetro del hilo (cm).

P = potencia (W).

V = voltaje (V).

ρ = resistividad ($\Omega \cdot \text{mm}^2$).

C_t = coeficiente de resistividad.

P = carga específica (W/cm^2).

1.3.6 Resistencias de Kanthal

El Kanthal es una palabra mundialmente de renombre dentro del campo de los sistemas de calefacción, por medio de resistencias que están diseñadas para todo tipo de hornos eléctricos industriales. En la actualidad, las resistencias de Kanthal soportan hasta temperaturas de 1,850 °C. El Kanthal Super es un material compuesto de disilicio de molibdeno y un componente de óxido. Por ello, el Kanthal Super es un material único que combina lo mejor de las propiedades de los materiales metálicos y cerámicos. Kanthal tiene la capacidad de soportar la oxidación a altas temperaturas. Esto se debe a la formación de una fina y adhesiva capa protectora de vidrio de cuarzo sobre la superficie. Cuando el Kanthal es utilizado a temperaturas alrededor de 1,200 °C el material se vuelve dúctil, mientras que a temperaturas más bajas el material es más frágil.

La resistividad del kanthal aumenta bruscamente con la temperatura. Esto significa que cuando los elementos están conectados a una tensión constante, la potencia será más alta a temperaturas más bajas y se reducirá gradualmente con el aumento de la temperatura, acortando así el tiempo para que el horno alcance la temperatura de funcionamiento. La resistencia de un elemento a 20 °C es aproximadamente 11 veces menor que la resistencia del mismo elemento a 1,500 °C. Por lo tanto, si se aplica tensión completa al arrancar, una corriente de pico de 11 veces la corriente nominal fluirá a través del elemento [22].

1.3.7 Sistemas de control

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado. Los sistemas de control en lazo abierto son los sistemas en los cuales la acción de control es, en cierto modo, independiente de la salida, siendo regulados generalmente por base de tiempo. Los sistemas de control de lazo cerrado son los sistemas en los cuales la acción de control depende de la salida, donde dicho sistema utiliza un sensor que detecta la respuesta real para compararla con una referencia a manera de entrada [23].

Por su parte, la temperatura de un horno eléctrico se mide mediante un sensor de temperatura analógico. La temperatura analógica se convierte a una temperatura digital mediante un convertidor A/D. La temperatura digital se introduce en un controlador mediante una interfaz. Esta temperatura digital se compara con la temperatura de entrada programada, y si hay una discrepancia el controlador envía una señal al calefactor, a través de una interfaz, amplificador y relé, para hacer que la temperatura del horno adquiriera el valor deseado. En la Figura 12 se muestra un diagrama del sistema de control de temperatura [24].

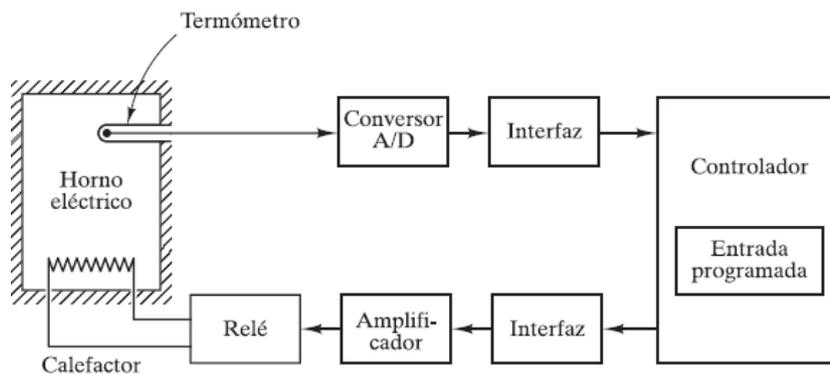


Figura 12. Sistema de control de temperatura [24].

1.3.8 Caudal del flujo de líquidos

El flujo de un líquido o de un gas a través de tuberías o ductos se usa comúnmente en sistemas de calefacción y enfriamiento y en redes de distribución de fluido. El fluido en estas aplicaciones usualmente se fuerza a fluir mediante un ventilador o bomba a través de una sección del flujo. La velocidad del fluido en una tubería cambia de cero en la superficie debido a la condición de no-deslizamiento hasta un máximo en el centro de la tubería. En el flujo de fluidos, es conveniente trabajar con una velocidad promedio V_{prom} , que permanece constante en flujo incompresible cuando el área de la sección transversal de la tubería es constante [25].

El caudal se define como el volumen de fluido por unidad de tiempo que pasa a través de una sección transversal a la corriente:

$$Q = \frac{V}{t} = AV \quad (10)$$

Donde:

Q = Caudal.

V = Volumen del fluido.

t = Tiempo en el que se desplaza una determinada cantidad de fluido.

V = Velocidad media del fluido.

A = Área de la sección transversal por la que pasa el fluido.

A partir de la ecuación de continuidad se puede deducir que el caudal de entrada es igual al de salida. Por lo que:

$$A_1V_1 = A_2V_2 \quad (11)$$

1.3.9 Número de Reynolds

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido, entre otros factores. Osborne Reynolds descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas en el fluido. Esta razón se llama número de Reynolds y se expresa para flujo interno en una tubería como [25]:

$$Re = \frac{V_{prom}D_h}{\nu} \quad (12)$$

Donde:

V_{prom} = Velocidad de flujo promedio (m/s)

D_h = Diámetro hidráulico.

ν = Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

Es deseable tener valores precisos de números de Reynolds para flujos laminar, transicional y turbulento. En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una tubería es:

$Re \leq 2,300$ flujo laminar.

$2,300 \leq Re \leq 4000$ flujo transicional.

$Re \geq 4,000$ flujo turbulento.

El diámetro hidráulico de un ducto rectangular se define como:

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} \quad (13)$$

Donde “a” es la longitud corta del rectángulo y “b” es la longitud larga del rectángulo.

1.3.10 Variación de la velocidad de rotación de la bomba

Cuando se varía la velocidad de rotación (n): el caudal de bombeo (Q) varía en proporción directa a la velocidad de rotación; la altura (H) varía con el cuadrado de la velocidad de rotación y la potencia (P) consumida varía con el cubo de la velocidad de rotación [26]:

La relación entre caudal y velocidad de rotación se define como:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (14)$$

1.3.11 Mecanismos de transmisión de movimiento

Existen diversos elementos de máquina utilizado para la transmisión de potencia. Los elementos de máquina flexible son bandas, cables, cadenas y otros similares utilizados en los sistemas de transporte para transmitir potencia a distancias comparativamente largas. También existen elementos relativamente rígidos como los engranes, ejes, cojinetes, entre otros dispositivos [27]. Por su parte, sólo se abordarán en este caso los mecanismos de interés para su implementación en el dispositivo en cuestión.

1.3.11.1 Engranés

Los engranes son empleados para transmitir movimiento de un eje a otro, como se muestra en la Figura 13, manteniendo la relación de transmisión constante, incluso transmitiendo grandes potencias. Una de las grandes ventajas de este tipo de transmisiones es que su campo de aplicación es prácticamente ilimitado, y es utilizado ampliamente en la transmisión de movimiento rotacional desde ejes de una fuente de energía (que pueden provenir de un motor eléctrico), hasta otro eje situado a cierta distancia y que ha de realizar un cierto trabajo. Debido a esto, uno de los engranajes, al estar conectado por la fuente de energía, es conocido como engranaje conductor, mientras que el otro que está conectado al otro eje se denomina engranaje conducido. Por su parte, otra de las ventajas que tienen las transmisiones por engranajes es que no patinan como las poleas, por lo que se tiene exactitud en la relación de transmisión, o bien, una muy buena eficiencia mecánica [28].

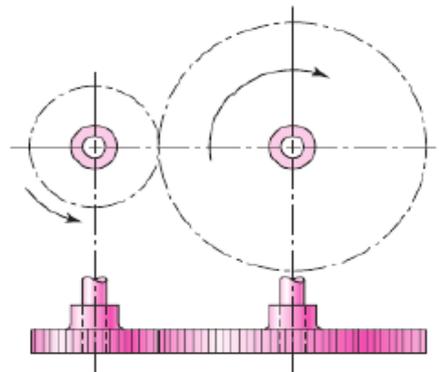


Figura 13. Transmisión de movimiento mediante engranes rectos [27].

Las velocidades de entrada (eje conductor) ω_1 y de salida (eje conducido) ω_2 se encuentran inversamente relacionados a los dientes de sus engranajes correspondientes, y, a su vez, a sus diámetros de paso (o diámetros primitivos), como se observa en la siguiente relación:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (15)$$

Donde:

$\omega_{1,2}$ = velocidades angulares de los ejes de entrada y de salida

$N_{1,2}$ = número de dientes de los engranajes de entrada y de salida

$D_{1,2}$ = diámetros primitivos de los engranajes de entrada y de salida

Además, la relación del diámetro de paso con respecto al número de dientes, se le conoce como módulo m , lo cual es útil para la clasificación de pares de engranes que pueden ser acoplados:

$$m = \frac{D}{N} \quad (16)$$

Por otro lado, se puede determinar la distancia entre centros C de un par de engranes a través de la siguiente relación:

$$C = \frac{N_1 + N_2}{2} m = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (17)$$

1.3.11.2 Tornillo Sinfín y piñón

Es un mecanismo diseñado para transmitir movimiento entre dos ejes que se cruzan perpendicularmente, y son utilizados principalmente cuando las relaciones de velocidad de los dos ejes son muy altas. Generalmente trabajan en ejes que se cortan a 90° , y tiene la desventaja de ser irreversible en el sentido de giro, o sea, este tipo de mecanismos sirven únicamente para la reducción de velocidades, no para su aumento [28]. Se compone de un tornillo cilíndrico (piñón) que ensambla en una rueda dentada cilíndrica con dentado helicoidal (corona), como se puede observar en la Figura 14.

Por otro lado, debido al contacto lineal entre el filete del tornillo y de los dientes del piñón, la transmisión de este tipo de mecanismos puede tomarse como la de un par de engranes planos, considerando, de la ecuación (16) que $N_2 = 1$, de esta forma, en una vuelta completa del tornillo, la rueda gira un arco igual al paso de la rosca del tornillo, o bien, la reducción del mecanismo es igual al número de dientes del piñón:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = N_1 \quad (18)$$

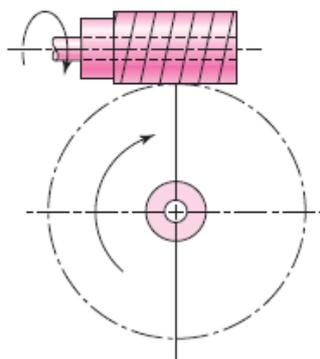


Figura 14. Mecanismo sinfín-piñón [27].

1.3.11.3 Torno - cuerda

Permite convertir un movimiento giratorio en uno lineal continuo. Básicamente consiste en un cilindro horizontal sobre el que se enrolla (o desenrolla)

una cuerda o cable cuando le comunicamos un movimiento giratorio a su eje. Este mecanismo se comporta igual que una palanca, donde BP es el radio de la manivela y BR es el radio del cilindro en el que está enrollada la cuerda. En la Figura 15 se puede observar un esquema del mecanismo de tambor [29].

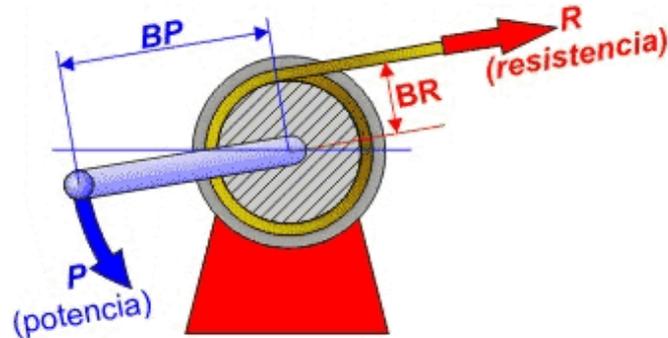


Figura 15. Mecanismos tambor [29].

Así mismo, la relación entre velocidad angular de entrada ω_i de este sistema a velocidad lineal de salida v_o se da por la siguiente ecuación:

$$v_o = r\omega_i \tag{19}$$

Donde r es el radio en el cual se encuentra enrollada la cuerda.

CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Como se ha expresado con anterioridad, el objetivo de este proyecto es la realización de un sistema de solidificación unidireccional vertical tipo Bridgman para crecimiento de monocristales, el cual estará conformado principalmente de tres subsistemas: de calentamiento, de enfriamiento y de movimiento. A continuación, se realiza un análisis general de los distintos subsistemas que componen el dispositivo en cuestión, con el fin de identificar sus requerimientos y necesidades principales, que serán de utilidad para el adecuado desarrollo del diseño detallado. Así mismo, para fines prácticos, se analiza además el subsistema correspondiente a la parte eléctrica y electrónica, encargada del desarrollo del monitoreo y control de los parámetros de interés dentro del proceso.

2.1.1. Sistema de calentamiento

El sistema de calentamiento debe realizar la correcta fundición del material o aleación, mediante temperaturas por encima del punto de fusión de la muestra, el cual no deberá de ser mayor a 800 °C (conforme a lo especificado en los objetivos específicos del documento).

Como punto de partida, debe analizarse el crisol a utilizar en el proceso. La elección del material del crisol depende del material o aleación a fundir. Los materiales más comunes en los crisoles utilizados para el crecimiento de monocristales son el grafito, molibdeno, iridio, teflón, cuarzo y platino [7]. Por su parte, las dimensiones de los crisoles suelen ser pequeñas, debido a que el fin de las muestras solidificadas es para su posterior estudio y el desarrollo de ciencia básica. Así mismo, se tiene en consideración que mientras mayor sea el tamaño de la muestra, el proceso será más costoso, debido a los lentos tiempos de solidificación, donde el calor debe ser suministrado durante todo el proceso para mantener el gradiente de temperatura constante [2].

Otro factor a considerar es el tipo de horno a utilizar. En los sistemas Bridgman se pueden utilizar hornos eléctricos por resistencia u hornos de inducción. Por su parte, en un horno de inducción, para aumentar la temperatura del metal que se desea fundir, se requiere someter la muestra a un campo magnético variable en el tiempo, y de amplitud considerable. Bajo estas condiciones, en el interior de la muestra se inducen corrientes que producen disipación de potencia, la cual se manifiesta con un incremento en la temperatura, pudiendo llegar al valor correspondiente que permita la fundición [30].

Por otro lado, los hornos eléctricos por resistencia hacen uso del “efecto Joule”, en el cual, si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor. Los materiales empleados para la fabricación de resistencias metálicas se clasifican en tres grupos: aleaciones

de base Niquel-Cromo, aleaciones Fe-Cr-Al (Kanthal) y otros materiales empleados como molibdeno, tántalo y tungsteno [19].

Por otra parte, uno de los requerimientos del sistema es que la temperatura sea medida dentro del crisol para la obtención de temperaturas a lo largo de su solidificación, y también cerca de la fuente de calor del horno para su control. Existen diversos sensores de temperatura como los RTD, termistores y termopares, sin embargo, los más utilizados en la implementación de hornos son los termopares ya que pueden proporcionar una respuesta más inmediata a los cambios de temperatura y soporta rangos de alta temperatura en comparación a los demás sensores.

El sistema de calentamiento del horno Bridgman debe ser capaz de regular los valores de temperatura de operación al inicio del proceso, ya que el usuario puede tener la necesidad de analizar distintos materiales o aleaciones con distintos puntos de fusión. Por lo tanto, el sistema de calentamiento requerirá el uso de algún sistema de control electrónico, el cual permita variar la temperatura a la especificada por el usuario, y mantenerla a lo largo del proceso.

Por otra parte, como se ha observado en las configuraciones de los distintos sistemas Bridgman abordados en el estado del arte, en seguida de este sistema se encuentra el de enfriamiento, por lo que requieren ser aislados térmicamente uno del otro para que no exista un flujo de calor entre ellos, y se mantenga constante el gradiente de temperatura durante el proceso. Así mismo, deberá de contar con paredes que puedan aislar las altas temperaturas internas del horno, evitando riesgos para el usuario y pérdidas de energía calorífica del sistema. Existen diversos materiales aislantes, sin embargo, los que soportan mayores temperaturas son los aislantes cerámicos y las lanas minerales como la lana de vidrio y lana de roca [31], además, para la fabricación de hornos, comúnmente se hace uso de arreglos de ladrillos refractarios, que además de aislar las altas temperaturas del sistema, son utilizados para darle solidez y forma a los hornos.

Por último, el sistema de calentamiento necesita una estructura que permita el correcto acomodo de los componentes y debe ser implementado con materiales que tengan puntos de fusión mayores a las temperaturas máximas que pueda alcanzar el horno. Así mismo, deberá de contar con paredes que puedan aislar las altas temperaturas internas del horno, evitando riesgos para el usuario, y pérdidas de energía del sistema.

2.1.2. Sistema de enfriamiento

En primer lugar, se debe considerar el tipo de sistema de enfriamiento para la solidificación de la muestra. Un alto grado en el control de la microestructura se puede lograr con la técnica de solidificación direccional, por lo que es ideal para el crecimiento de monocristales; estos se pueden obtener bajo condiciones de gradientes de temperatura grandes a velocidades de crecimiento lentas. Estas condiciones favorecen el crecimiento de una interfase sólido-liquido planar, las cuales permiten que se forme un cristal de composición uniforme [2]. Una forma

de obtener gradientes de temperatura elevados y de mantenerlos constantes, es utilizando un sistema de enfriamiento de flujo hidráulico, sin embargo, se debe tener especial cuidado en obtener un flujo laminar, ya que de otra forma un flujo turbulento podría afectar la formación de monocristales.

Debido a que se necesita un flujo constante en el sistema de enfriamiento, se requiere el uso de una bomba que permita la circulación del agua, dentro de la cuales, existen diversas clases: de émbolo, de diafragma, rotativas y centrífugas.

Las bombas de émbolo funcionan con un pistón dentro de un cilindro, donde la succión del pistón aspira el agua y el empuje del mismo lo envía con más o menos presión por la tubería. Las bombas de diafragma producen la aspiración e impulsión por medio de un diafragma deformable, donde un círculo de goma sujeto fuertemente en su periferia y empujado por su centro, arriba y abajo. Las bombas rotativas se componen de dos anillos giratorios de distinto centro, que tiene huecos y van llenándose y empujando el agua. La bomba centrífuga trabaja gracias a la gran velocidad de rotación que se le imprime, la cual consta de un disco con aletas (rodete y álabes), que gira dentro de un tubo circular que lo rodea, más estrecho al principio que al final, donde el agua entra en el tubo de aspiración al centro del rodete, los álabes la empujan fuertemente contra las paredes por fuerza centrífuga, y el empuje de sucesivas porciones de agua hace subir a ésta por el tubo de impulsión [32].

Por otro lado, el sistema de enfriamiento requiere de un recipiente que permita a la bomba succionar el agua almacenada y empujarla hacia el crisol, así mismo, este sistema deberá contar con una salida del flujo de agua que retorne al contenedor, con lo que se consigue una recirculación del líquido.

Así mismo, se propone la regulación de la velocidad con la que circula el agua dentro del sistema. La forma de regularlo dependerá del tipo de alimentación de la bomba, ya sea de corriente continua o corriente alterna. Por consiguiente, la bomba necesitará un sistema de control electrónico, con su respectiva etapa de potencia, que permita regular el flujo del agua.

Finalmente, debido a que el crisol debe desplazarse desde el horno hacia dentro de este sistema, se debe permitir su movimiento de manera fluida, y así mismo, se debe cuidar que no haya fugas de agua hacia el sistema mecánico, o bien, hacia el ambiente. Para ello, se plantea el diseño y la colocación de un sello mecánico, las cuales tendrán el diámetro del crisol para que éste pase sin problemas, y tendrán la principal función de bloquear el paso del fluido a los sistemas vecinos.

2.1.3. Sistema de movimiento

Como se ha dicho anteriormente, el sistema de movimiento debe desplazar el crisol con la fundición dentro del sistema de calentamiento hacia el sistema de enfriamiento a una velocidad constante. Una de las particularidades es que la

rapidez con la que requiere ser movido el crisol se encuentra en el orden de $\mu\text{m/s}$.

En un inicio, debe de considerarse la controlabilidad del tipo de motor a utilizar pues, como ha sido mencionado, se propone que el usuario regule la velocidad de desplazamiento del crisol hasta una mínima de $10 \mu\text{m/s}$, con el fin de que puedan obtenerse distintas microestructuras de la muestra. Esto mismo, será uno de los puntos de partida del diseño detallado de este sistema.

Por otra parte, existen diversas formas de reducir dicha velocidad. Los engranes son empleados para transmitir movimiento de un eje a otro, y si el diámetro del piñón es menor al del engrane, se obtendrá una reducción de la velocidad. Otro método empleado puede ser el uso de poleas y bandas, empleados para transmitir movimiento mediante un elemento flexible y de bajo costo. Por último, puede ser empleado un mecanismo de tornillo sinfín-piñón, el cual puede transmitir un movimiento giratorio entre dos ejes que se cruzan perpendicularmente y posee una gran reducción de velocidad, que depende principalmente del número de dientes del piñón [27].

Por otra parte, existen diversos mecanismos que transforman movimiento rotatorio en un movimiento lineal continuo. El mecanismo piñón-cremallera permite esta conversión, o viceversa, siendo muy apreciado para conseguir movimientos lineales de precisión. Cuando el avance lineal exige mucha precisión y una fuerza longitudinal grande puede ser empleado un mecanismo tornillo-tuerca, el cual por cada vuelta del tornillo la tuerca solamente avanza la distancia de su paso. Por último, el torno de cuerda permite convertir un movimiento giratorio en uno lineal, consistiendo en un cilindro horizontal (liso o roscado) sobre el que se enrolla una cuerda o cable [29].

Por último, se debe de considerar el uso de rodamientos, ejes y acoples dentro de la estructura, que permitan la adecuada colocación y movimiento de los elementos de transmisión, y que, además, eviten deslizamientos o fuerzas de contacto indeseadas que afecten el desplazamiento de la muestra durante el proceso.

2.1.4. Sistema eléctrico y electrónico

El sistema deberá contar con una interfaz hombre-máquina, a través de la cual, puedan ser introducidos los parámetros iniciales para el funcionamiento del sistema conforme a lo requerido por el usuario, como lo es, la velocidad de desplazamiento de la muestra, el flujo de agua para el sistema de enfriamiento, así como la temperatura deseada dentro del horno. Así mismo, a través de esta interfaz deberán de ser mostrados los valores actuales de éstos a lo largo del proceso.

Por otra parte, se propone la realización de mediciones periódicas de la temperatura de la muestra en un punto específico a lo largo del proceso, con el

fin de obtener un perfil que muestre el comportamiento de la variación de su temperatura a lo largo de su solidificación.

A su vez, se requerirá de una caja electrónica la cual contenga dispositivos de protección y accionamiento, así como al sistema de control electrónico, con sus respectivos circuitos de potencia para los actuadores, y de acondicionamiento para los sensores.

2.1.5. Resumen

Las necesidades de cada uno de los sistemas que conforman el dispositivo Bridgman, son condensadas dentro de las siguientes tablas morfológicas (*De la Tabla 3 a la 5*), donde se muestran algunas de las necesidades y posibles soluciones a cada uno de ellas.

Tabla 3. Tabla morfológica del sistema de calentamiento.

Sistema de calentamiento					
Parámetros	Crisol	Tipo de horno	Sensor	Tipo de controlador	Aislante térmico
1	Grafito	Horno inducción	RTD	PID	Fibra cerámica
2	Molibdeno	Horno resistencia	Termistor	Difuso	Lana de vidrio
3	Iridio		Termopar	ON/OFF	Lana de roca
4	Cuarzo				Silicato de calcio

Tabla 4. Tabla morfológica del sistema de enfriamiento.

Sistema de enfriamiento			
Parámetros	Tipo de bomba	Tipo alimentación bomba	Material de la estructura
1	Émbolo	Corriente directa	Acrílico
2	Diafragma	Corriente alterna	Acero
3	Rotativa		
4	Centrífuga		

Tabla 5. Tabla morfológica del sistema de movimiento

Sistema de movimiento				
Parámetro	Tipo de motor	Transmisión de movimiento rotatorio	Transmisión de movimiento rotatorio a lineal	Rodamientos
1	Motor C.C.	Engranés	Piñón-cremallera	Chumaceras
2	Motor C.A.	Poleas y bandas	Tornillo-tuerca	Baleros
3	Motor paso a paso	Catarinas y cadenas	Torno de cuerda	
4		Sinfín-piñón		

CAPÍTULO 3. DISEÑO

3.1. SISTEMA DE CALENTAMIENTO

En el planteamiento del problema se mencionaron los tipos de horno que pueden ser utilizados para el sistema Bridgman, siendo estos el horno de inducción y el horno eléctrico por resistencia. Las dos opciones pueden cubrir las necesidades requeridas para la fundición de los materiales, sin embargo, realizando una comparación entre ambos, el horno de inducción requiere de mayor tiempo de implementación y recursos económicos para llevarse a cabo, y el horno eléctrico por resistencias se desarrolla en un tiempo y costo relativamente menor, además de que son los más comúnmente utilizados para la fundición de metales no ferrosos, y que el mantenimiento de los equipos es relativamente bajo en comparación a otros. En base a esto, se toma esta última opción como punto de partida para llevar a cabo el diseño del horno de fundición, pues, se toma en cuenta que la construcción del horno es una de las tres partes del sistema de solidificación unidireccional, con lo que se pretende la optimización de tiempos y recursos económicos.

3.1.1. Elementos que componen el sistema

3.1.1.1. Crisol de grafito

Este es el elemento que contendrá la fundición que tendrá que solidificarse; durante el proceso se encontrará sujeto a altas temperaturas para la fusión del material y a su vez, estará en contacto con el sistema de enfriamiento.

Para eliminar o minimizar la convección en las aleaciones solidificadas verticalmente, es necesario, no solo tener un gradiente de densidad hidrodinámico, sino también un gradiente de densidad horizontal cercano a cero. Una forma de mantener estas condiciones es teniendo una interface sólido-liquido macroscópica planar todo el tiempo. Una interface macroscópica planar se puede obtener usando muestras de diámetros menores o igual a 4 mm [2].

Otro factor a considerar en las dimensiones del crisol es el consumo energético. El método de Bridgman es un proceso muy lento, pues como se ha descrito con anterioridad, el desplazamiento del crisol se lleva a cabo a velocidades del orden de los $\mu\text{m/s}$, por lo que las muestras solidificadas pueden obtenerse después de varias horas de operación, por lo cual sería muy costoso utilizar muestras de dimensiones considerables, pues la energía requerida para fundirlas sería mucho mayor. Además, las muestras son para fines académicos y de investigación, por lo que no se requieren grandes diámetros para su estudio. Bajo esta consideración, se utilizarán crisoles que permitan la fundición de muestras de 3 mm de diámetro.

Para la selección del material del crisol se consideraron varios materiales, sin embargo, se escogió el grafito por sus buenas propiedades. El grafito tiene un

punto de fusión cercano a 3,500 °C, posee una baja conductividad eléctrica que aumenta proporcionalmente a la temperatura, soporta altos gradientes de temperatura y posee una buena conductividad térmica.

Sabiendo el diámetro del crisol y su material se propuso el uso de un crisol con las dimensiones mostradas en la Figura 16, el cual sea de utilidad para el proceso de fundición de la muestra, y así mismo, sea de fácil acoplamiento a un mecanismo para su desplazamiento a lo largo de su solidificación. La parte A del crisol se encuentra hueca y contiene una rosca interior que permita acoplar el crisol a algún mecanismo. La zona B está constituida por una zona de grafito sólido la cual le da soporte al crisol y actúa como disipador de calor. La parte C es la principal del crisol donde se introduce y funde la muestra. El diámetro interior del crisol es de aproximadamente 3.16 mm y el exterior de 6.66 mm, por lo tanto, el crisol permite el uso de muestras de aproximadamente 3 mm de diámetro.

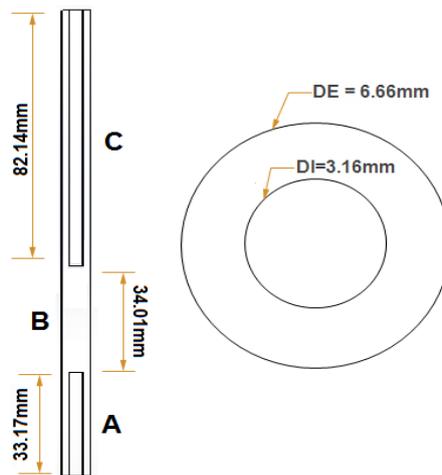


Figura 16. Dimensiones del crisol de grafito.

3.1.1.2. Susceptor de grafito

La principal función del susceptor es que ayuda a homogeneizar la temperatura sobre el crisol; éste es un cilindro sólido de grafito el cual tiene una perforación en el centro, dentro del cual puede ser deslizado el crisol. De esta forma permite el desplazamiento de la fundición en una sola dirección evitando movimientos indeseados. Su diámetro interior es de 6.66 mm y un diámetro exterior de 55 mm.

3.1.1.3. Tubo de alúmina

Se utiliza para dotar de rigidez a las partes internas de grafito, además de utilizarse como aislante eléctrico entre el grafito y la resistencia ya que el grafito

a mayor temperatura mayor conductividad eléctrica presenta. También se utiliza para homogeneizar la temperatura dentro del tubo.

Es un tubo hecho de alúmina, el cual es maquinable y denso para aplicaciones de alta temperatura, debido a su alto punto de fusión de 2,072 °C. Es resistente al choque térmico y tiene una alta resistencia dieléctrica. En el interior del tubo se encuentra el suscepto y el crisol de grafito. El exterior del tubo se encuentra en contacto la resistencia eléctrica enrollada. Se propone que el diámetro interior del tubo sea de 55 mm, mientras que el exterior sea de 63.5 mm.

3.1.1.4. Ladrillo refractario

Será colocado un arreglo de ladrillos en la parte exterior del tubo de alúmina y de la resistencia, con el fin de aislar el sistema para evitar la mayor cantidad de pérdidas posibles. Se selecciona el ladrillo refractario debido a su gran característica de resistencia a altas temperaturas (de hasta 1,665 °C) y su gran capacidad de absorción calorífica. Además, se utilizará debido a su accesibilidad económica.

Se propone la construcción de una estructura de ladrillos en forma hexagonal (por 6 ladrillos), la cual se encuentra determinada por el diámetro exterior del tubo de alúmina y de las dimensiones del ladrillo que es de 229 x 114 x 64 mm. En base a esto, es determinada la altura del horno, la cual será de 229 mm.

Se realizaron cálculos para la obtención de las medidas del arreglo de ladrillos, como se observa en el croquis mostrado en la Figura 17.

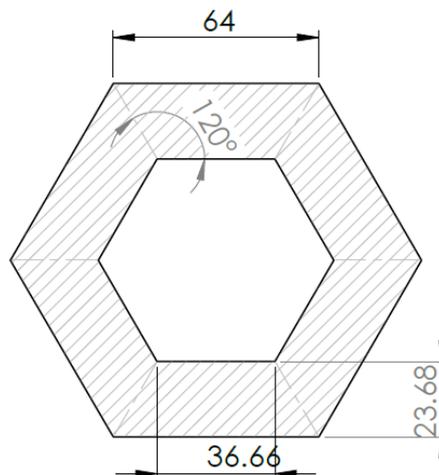


Figura 17. Croquis para la determinación del arreglo hexagonal de ladrillos.

3.1.1.5. Fibra cerámica

La fibra cerámica se utilizará como protección extra y como un aislante de seguridad del horno ya que tiene una baja conductividad térmica, además de que soporta temperaturas de trabajo de hasta 1,200 °C. Ésta será colocada en la parte externa del arreglo de ladrillos, lo que también ayudará a obtener una forma cilíndrica del horno para ser contenido dentro de una lámina de acero. Se utilizará una fibra cerámica de aproximadamente una pulgada (25.4 mm) de espesor alrededor del horno de ladrillo.

3.1.1.6. Lámina de acero

En la parte externa del horno será colocada una lámina de acero rolado en frío con configuración cilíndrica, la cual se encontrará soldada, y contendrá todos los materiales y estructura interna del horno, de forma que se tenga una estructura compacta. Finalmente, en base a la configuración propuesta, se obtiene un diámetro externo final del horno de 161.65 mm, con lo que será utilizada una lámina de 507.83 mm de largo y 229 mm de alto.

3.1.1.7. Tapa del horno

Se plantea la realización de una tapa cilíndrica (con el diámetro exterior igual al del horno) para la parte superior del horno, de una pulgada de espesor de fibra cerámica y recubierta por la misma lámina de acero mencionada anteriormente, misma que tendrá que encontrarse soldada en sus uniones. Esto es con el fin de evitar los escapes de calor al medio ambiente por la parte superior del sistema, y sea aún más sencillo el alcanzar las temperaturas deseadas en el sistema.

3.1.2. Ensamblaje de sistema de calentamiento

A través del software de diseño CAD de SolidWorks® se realiza el dibujo de cada una de las partes anteriormente mencionadas del sistema de calentamiento, así como de su ensamblaje propuesto en la Figura 18. Véase en la Figura 18(b) que claramente existen espaciamentos huecos entre el tubo de alúmina y la estructura hexagonal de ladrillo refractario, mismo lugar en el cual será enrollada la resistencia a lo largo del horno, y será la causante de la elevación de la temperatura para la fundición de la muestra.

Se propone que los elementos del horno, como lo son el tubo de alúmina y el susceptor de grafito, puedan ser desmontables en caso de requerir un cambio en cuanto a la resistencia. Cabe decirse que el ladrillo refractario, la fibra cerámica y la lámina de acero contarán con orificios para el acoplamiento de la resistencia y de la introducción del termopar al interior del horno.

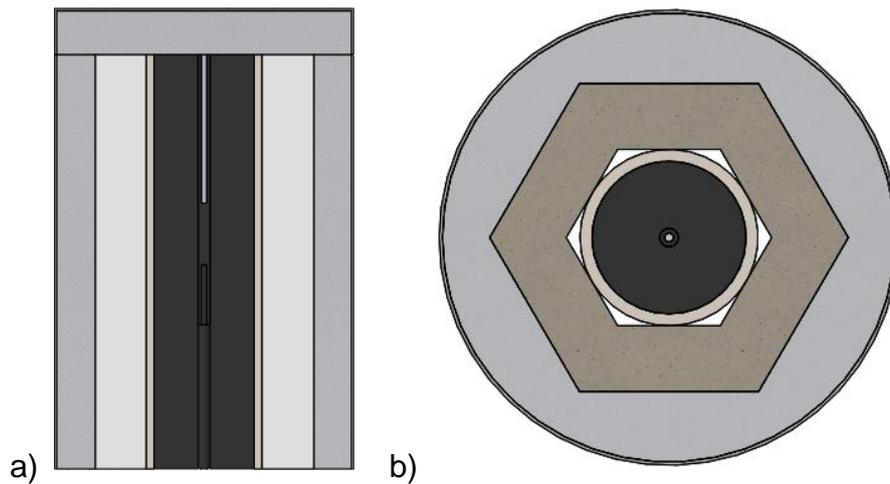


Figura 18. Vistas a) de sección lateral y b) de sección superior del ensamblaje básico del horno.

3.1.3. Energía requerida para llevar a cabo la fusión del material

Para este análisis, se toma en cuenta únicamente la fundición de tres materiales, pues son los que se pretenden utilizar principalmente para los fines académicos a los que se destina este proyecto: aluminio, zinc y magnesio.

Para la realización de los cálculos energéticos, se considera la masa de los materiales en base al volumen máximo del interior del crisol y de su densidad, así como sus temperaturas de fusión, calores específicos y coeficientes de transferencia de calor por convección, los cuales se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades físicas de los materiales a fundir.

Material	Masa (kg)	Punto de fusión (°C)	Calor específico ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	Coefficiente convectivo ($\frac{KJ}{kg}$)
Alumino	1.739×10^{-3}	660	900	394
Zinc	4.593×10^{-3}	420	390	111
Magnesio	1.120×10^{-3}	650	1,023	368.47

A continuación, se propone que los materiales alcancen la temperatura máxima de operación del horno de 800 °C, con lo que, debido a que todos estos tienen un punto de fusión por debajo de esta temperatura, es necesario el calcular la energía total como la suma del calor necesario para que el material alcance los 800 °C, haciendo uso de la ecuación (1), más el calor latente, con la ecuación (2), con lo que se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 7. Así mismo,

obsérvese que se determina la potencia necesaria para llevar a los materiales a la temperatura deseada en un intervalo de media hora.

Tabla 7. Calor y potencia necesarios para llevar los materiales a 800 °C.

Material	Calor para alcanzar los 800 °C (J)	Calor latente (J)	Calor total (J)	Potencia total en 30 min (W)
Aluminio	1212.95	685.16	1,898.11	1.054
Zinc	1388.23	509.82	1,898.05	1.054
Magnesio	887.96	412.69	1,300.65	0.722

De la Tabla 7, entonces, se observa que se requiere mayor energía y potencia para la fundición de muestras de aluminio y del zinc, con una potencia aproximada de 1.054 W, la cual será considerada para los análisis posteriores, para determinar la potencia que deberá de ser disipada por la fuente de calor.

3.1.4. Análisis de pérdidas del sistema

Como fue expresado con anterioridad, la acumulación de calor en las paredes tendrá como efecto un consumo mayor de energía. Para este análisis de pérdidas se tomarán únicamente las paredes concéntricas (laterales), por simplicidad, debido a la geometría cilíndrica del sistema y la colocación de la resistencia.

Las paredes del sistema de calentamiento propuesto están constituidas en dos partes: las paredes externas a la resistencia, las cuales están conformadas por ladrillo refractario, fibra cerámica y lámina de acero; y las paredes interiores a la resistencia, las cuales están conformadas por un tubo de alúmina, el suceptor de grafito y el crisol.

3.1.4.1. Paredes internas

Para este análisis, se considera que la temperatura máxima interna del crisol como 800 °C y la temperatura máxima de la resistencia eléctrica al exterior del tubo de alúmina como 810 °C, tal como se muestra el esquema de la Figura 19. La pequeña diferencia de temperatura se propone debido a que los materiales considerados en este análisis poseen una buena conductividad térmica.

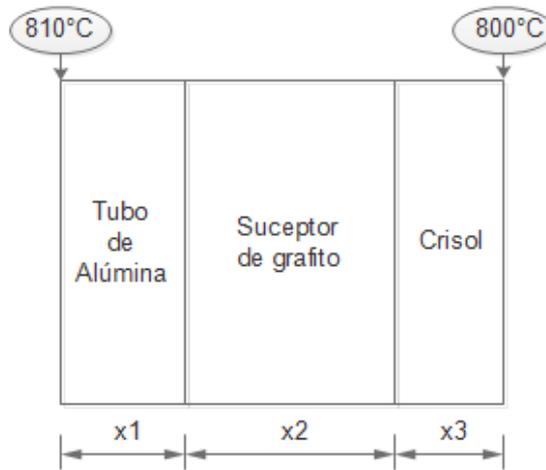


Figura 19. Esquema de la distribución de las paredes internas.

Para las paredes internas del horno se muestra en la Figura 20 un esquema de los radios, conductividades y coeficiente de transferencia a utilizar, donde se considera al crisol de grafito y el suceptor de grafito como una sola pared

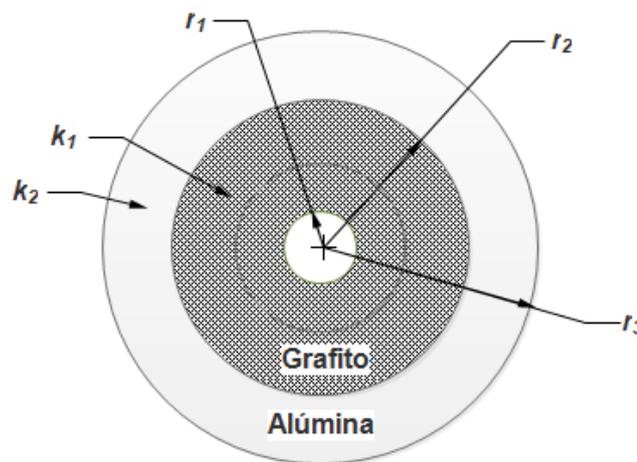


Figura 20. Esquema de las paredes internas del sistema de calentamiento.

Así mismo, se considera una capa de suceptor de grafito y crisol con una conductividad térmica de $k_1 = 116 \frac{W}{m^{\circ}C}$ y un radio interno $r_1 = 1.58 \text{ mm}$ y externo $r_2 = 26.75 \text{ mm}$, además de una capa de alúmina con una conductividad térmica de $k_2 = 35 \frac{W}{m^{\circ}C}$ y un radio interno r_2 , y externo de $r_3 = 31.75 \text{ mm}$. Por su parte, se desprecian los términos convectivos de la ecuación (3) en el interior del horno ya que los elementos se encuentran en contacto directo y se considera una longitud $L = 229 \text{ mm}$ para cada una de las capas. Teniendo estos datos, y utilizando la ecuación (4) para calcular las pérdidas de calor en el interior del horno se tiene que son de 500.76 W .

3.1.4.2. Paredes externas

En este caso, se toma en cuenta nuevamente la temperatura máxima de la resistencia como 810 °C y la temperatura ambiente al exterior de la lámina de acero como 25 °C, tal como se muestra el esquema de la Figura 21.

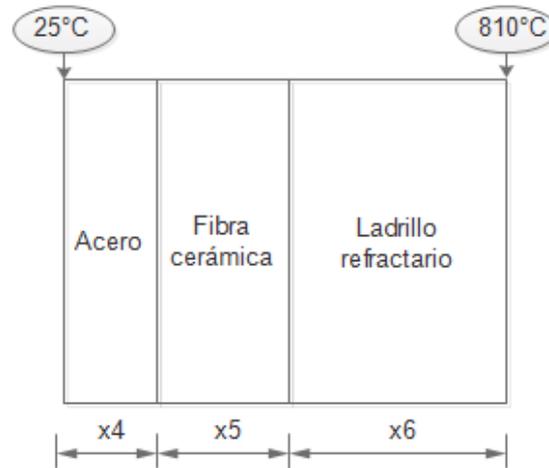


Figura 21. Esquema de la distribución de las paredes externas.

Para las paredes internas del horno se muestra en la Figura 22 un esquema de los radios, conductividades y coeficiente de transferencia a utilizar

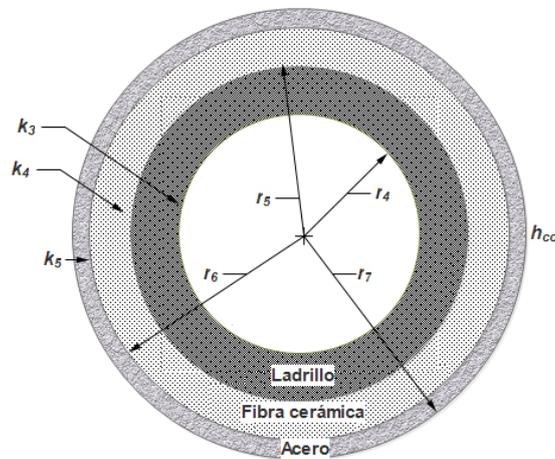


Figura 22. Esquema de las paredes externas del sistema de calentamiento.

Para esto, se considera una capa de ladrillo cerámico con una conductividad térmica de $k_3 = 0.47 \frac{W}{m^{\circ}C}$, un radio interno $r_4 = 31.75 \text{ mm}$ y radio externo $r_5 = 55.42 \text{ mm}$, además de una capa de fibra cerámica con una conductividad térmica de $k_4 = 0.19 \frac{W}{m^{\circ}C}$, un radio interno r_5 y un radio externo $r_6 = 80.83 \text{ mm}$, y una capa de acero con una conductividad $k_5 = 48 \frac{W}{m^{\circ}C}$, radio interno r_6 y radio externo $r_7 =$

82.04 mm. Así mismo, se toma el coeficiente de transferencia de calor por convección del aire de $h_{co} = 25 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ y una longitud $L = 229 \text{ mm}$ para cada una de las capas. Utilizando la ecuación (4) para calcular las pérdidas de calor en el exterior del horno se tiene una pérdida de calor de 356.08 W.

De la ecuación (3) sumando las pérdidas de energía se obtiene una pérdida total de 856.84 W. Ahora bien, si esta potencia se suma a la máxima necesaria para fundir una muestra de aluminio (o zinc) a 800 °C, se tiene que la potencia que tendrá que disipar la resistencia dentro del sistema deberá de ser al menos de:

$$P_T = 500.76 \text{ W} + 356.08 \text{ W} + 1.054 \text{ W} = 857.89 \text{ W}$$

Partiendo de esto, se propone por efectos de diseño, tomar en cuenta una potencia de $P_T = 1,000 \text{ W}$, por posibles pérdidas de energía en el sistema no consideradas.

3.1.5. Parámetros eléctricos del sistema

Ahora que se ha escogido el horno eléctrico por resistencia se realizará la elección del material de la resistencia a utilizar. Como se mencionó con anterioridad, las resistencias más utilizadas para su aplicación en hornos son las de aleaciones de base Ni-Cr, aleaciones Fe-Cr-Al (Kanthal) y otros materiales como el molibdeno. Las resistencias de molibdeno son las que mayores temperaturas soportan (2,600 °C), sin embargo, a partir de los 600 °C pueden presentar oxidación si no son operadas en vacío o en atmósfera reductora. Las resistencias de Kanthal presentan una resistividad eléctrica mayor a las de Ni-Cr, una temperatura de fusión más elevada (1,500 °C) y una excelente resistencia a la oxidación [24]. Bajo esta consideración se elige el Kanthal como material a utilizar debido a sus buenas propiedades y una temperatura máxima adecuada para la aplicación.

3.1.5.1. Ley de Ohm

Para la obtención de la resistencia eléctrica y de la corriente consumida por el alambre de Kanthal, se propone una alimentación de 220 V_{rms} obtenida de la conexión entre un par de líneas vivas de 127 V_{rms}. Sabiendo en base a los cálculos que la potencia requerida aproximada para la fundición de la muestra dentro del horno es de 1000 W, la corriente tendrá un valor de:

$$I_{rms} = \frac{1,000 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 4.54 \text{ A}$$

Así mismo, mediante la ley de Ohm se puede encontrar la resistencia eléctrica requerida, la cual, por deducción, debería ser la máxima a considerar, con el fin de que pueda suministrarse al menos la potencia calculada de 1000 W:

$$R_{max} = \frac{V}{I} = \frac{220 V}{4.54 A} = 48.46 \Omega$$

Preferentemente, se debería de obtener una resistencia cercana y menor a R_{max} , con el fin de que el consumo de corriente no exceda lo establecido por el interruptor termomagnético de la instalación eléctrica del sistema (el cual se aborda posteriormente en el diseño eléctrico).

3.1.5.2. Cálculo del diámetro del hilo de la resistencia

Una vez teniendo la resistencia propuesta para que el sistema al menos brinde la potencia calorífica requerida, se puede calcular un diámetro propuesto de la resistencia de Kanthal en base a la ecuación (9).

Para la determinación del factor de resistividad C_t , se puede observar en la tabla del Apéndice 1 su valor a diferentes temperaturas de las resistencias de Kanthal A-1. Tomando en cuenta una temperatura de 800 °C, el factor resultante es de $C_t=1.03$.

Por otra parte, en el Apéndice 2 se puede observar el valor de la carga específica de la resistencia p dependiendo del acomodo geométrico de la resistencia a una temperatura dada. Considerando un acomodo tipo "b" como se muestra en el Apéndice 2, a una temperatura de 800 °C se tiene que la carga específica de la resistencia es $p=6 W/cm^2$.

Así mismo, sabiendo que la resistividad del Kanthal A-1 es $1.45 \times 10^{-4} \Omega cm$, el diámetro del hilo de la resistencia eléctrica propuesto para 1000 W y 220 V obtenido de la ecuación (9) es:

$$d = 0.08 \text{ cm} = 0.8 \text{ mm}$$

Para efectos de diseño, se propone la elección de un diámetro cercano de 0.95 mm de diámetro, con el fin de que no tenga problemas para disipar incluso una potencia mayor.

Posteriormente, en base a la resistencia máxima obtenida y a la ecuación (6) se puede obtener la longitud máxima de la resistencia, la cual resulta ser:

$$L_{max} = \frac{R_{max} A}{\rho} = \frac{(48.46 \Omega)(\pi)(0.095 \text{ cm})^2}{(4)(1.45 \times 10^{-4} \Omega cm)} = 2368.93 \text{ cm} = 23.69 \text{ m}$$

En base a esto, se puede proponer una longitud de 12 m, con la cual, para el diámetro de 0.095 cm, disiparía una potencia aproximada de 1971 W y una corriente de 8.96 A, la cual no es tan elevada, y bien puede ser soportada por un interruptor termomagnético de 20 A (el cual será abordado para el diseño eléctrico del sistema).

Así mismo, si se considera que la corriente máxima a utilizar es de 8.96 A, deberían de usarse al menos cables de calibre 18, los cuales soportan una corriente máxima de 14 A a aproximadamente 90 °C, lo cual también depende del tipo de cable a usar, conforme a la norma oficial mexicana de instalaciones eléctricas NOM-001-SEDE como se muestra en el Apéndice 3. Sin embargo, para la conexión entre los cables eléctricos y la resistencia se propone el uso de un bloque cerámico como terminal, el cual disipa considerablemente el calor con el fin de no afectar en gran medida los cables eléctricos.

3.1.6. Simulación de sistema de calentamiento

A través de la simulación térmica se pretende obtener el tiempo y la potencia a la que llega una barra de aluminio contenida dentro del crisol a una temperatura de 800°C dentro del horno, con el fin de validar los cálculos realizados anteriormente. Se hará uso del software SolidWorks® para la realización del estudio térmico.

Para esto se identifican los parámetros de interés para cada uno de los materiales implicados en el horno, de tal forma que la simulación se aproxime al comportamiento real del sistema, haciendo uso de las propiedades usadas en los cálculos. Para el análisis térmico se observa que únicamente es necesaria la conductividad térmica y el calor específico de los materiales en cuestión, observados en la Tabla 8, mismos que son insertados de forma manual en el análisis. Así mismo, se consideran los efectos de la convección del aire a una temperatura de 25 °C en las paredes exteriores del horno con $h_{co} = 25 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ como en los cálculos realizados anteriormente.

Tabla 8. Materiales del horno y propiedades térmicas.

Material	Conductividad térmica W/(mK)	Calor específico J/(KgK)
Grafito	116	712
Alúmina	35	850
Fibra	0.19	1129.68
Ladrillo	0.47	836.8
Acero	48	420

Por otro lado, para efectos de simplicidad y con el fin de que el cálculo de las operaciones en el software no sea tan tardado y no tenga consumo de memoria alto se considera en la simulación, que es colocada la fuente de calor en la cara externa del tubo de alúmina de manera homogénea.

En primera instancia, se considera la potencia mínima para la cual la muestra pueda llegar a la temperatura máxima de 800 °C, que, en base a la simulación, resulta ser de 365 W.

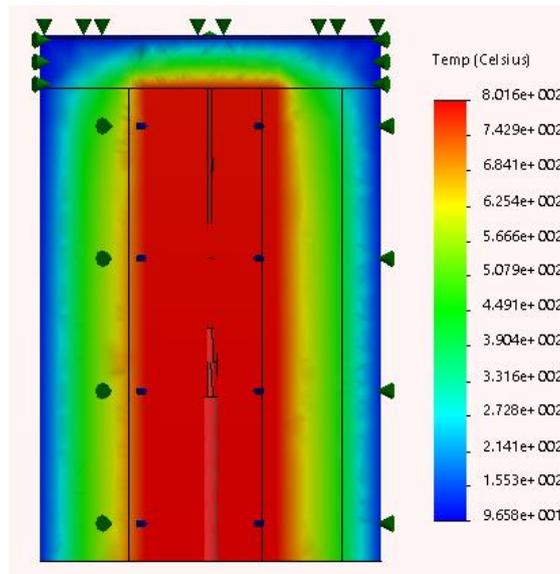


Figura 23. Simulación térmica en SolidWorks® en la cual la muestra alcanza los 800°C.

De esta simulación, mostrada en la Figura 23, se aprecia que la energía en la parte interior de la colocación de la resistencia se mantiene prácticamente igual, con lo que se comprueba la buena conductividad térmica del grafito y de la alúmina para nuestra aplicación. Por su parte, véase que la temperatura externa del sistema es de aproximadamente 96 °C, lejos del número propuesto en los cálculos, sin embargo, se comprueba que el ladrillo refractario y la fibra cerámica son muy buenos aislantes térmicos para nuestra aplicación.

Ahora bien, resulta de interés, la obtención del tiempo para el cual se llega a esta temperatura de la muestra, para ello se realiza un estudio térmico en régimen transitorio, con el fin de obtener la curva de temperatura contra tiempo, con condiciones iniciales en las cuales el sistema se encuentra a temperatura ambiente de 25 °C. De esto, se obtiene el gráfico mostrado en la Figura 24, en el cual se observa una curva de asentamiento de forma exponencial, que aproximadamente converge en un tiempo de 36,200 s, o bien, 3 h, 10 min y 20 s. Lo cual es un tiempo prolongado para la fundición de la muestra.

De este comportamiento se comprueba que efectivamente puede alcanzarse la temperatura máxima de la muestra de 800 °C a una potencia de al menos 370 W. Partiendo de esto, se plantea entonces, que será más sencillo y rápido el proceso en el que la muestra llegue a una temperatura de 800 °C si la potencia de entrada del sistema resulta ser la calculada previamente, de 1,971 W; cambiando la potencia de entrada a este valor dentro de la simulación, se obtiene que el tiempo en que la muestra llega a la temperatura deseada es de aproximadamente 866 s, equivalente a 14 min y 26 s, el cual resulta ser un tiempo mucho más reducido que el anterior.

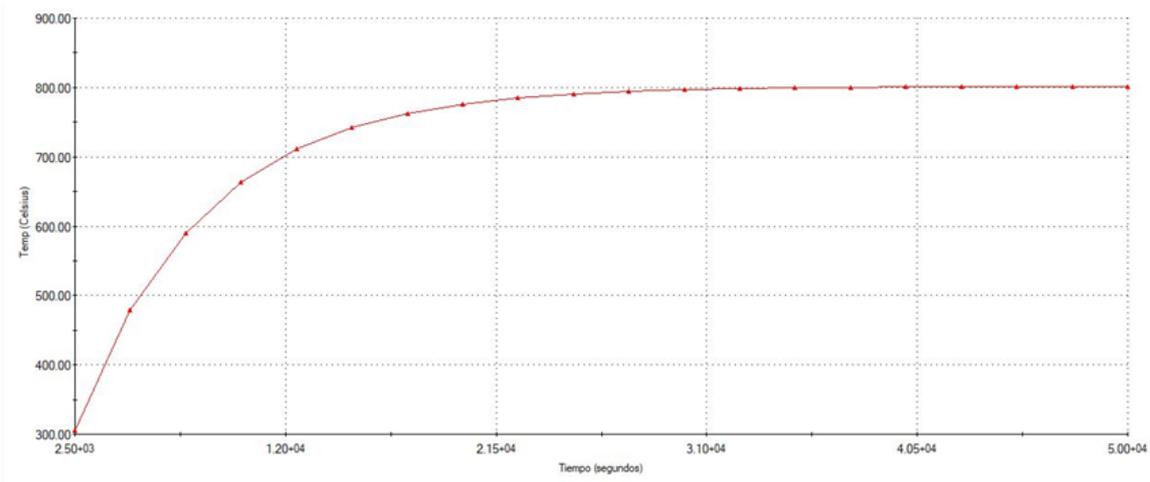


Figura 24. Curva de temperatura contra tiempo de la muestra para una potencia de 370 W.

3.1.7. Elemento de medición

Para la selección del sensor de temperatura se mencionó que existen las opciones de RTD, termistor y termopar. De igual forma, se mencionó que los termopares eran mayormente utilizados en la implementación de hornos ya que pueden proporcionar una respuesta más inmediata a los cambios de temperatura y soportar rangos mayores de temperatura en comparación a los demás sensores. Sin embargo, existen diversos tipos de termopares mostrados en el Apéndice 4, donde se puede observar el tipo de termopar, su composición química, el rango de aplicación y algunas características.

Recordando que la temperatura máxima alcanzada por el horno será de 800 °C, varios tipos de termopar podrían ser utilizados en el sistema de calentamiento, sin embargo, se opta por el uso de termopares tipo K, ya que posee un mayor rango de temperaturas de aplicación y puede ser utilizado en atmósferas oxidantes.

Cabe destacar que los termopares utilizados para el monitoreo de temperatura de la muestra se deben colocar dentro del crisol, sin embargo, existe la restricción de que el diámetro en el cual se encuentra la muestra es de 3 mm. Los termopares comerciales son de dimensiones más grandes a las requeridas por lo que será necesario la fabricación termopares mediante alambres de cromel y alumel. Se observa en el Apéndice 5, entre más grande es el calibre del alambre del termopar menor es su rango de temperatura, para este caso, es recomendable el uso de calibres entre 20 y 24, principalmente por la capacidad que tienen para soportar la temperatura máxima que debe de alcanzar el horno.

3.2. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Como se mencionó con anterioridad, la técnica de enfriamiento a utilizar es hidráulica con flujo de agua constante, con el fin de evitar cambios considerables en el gradiente de temperatura del proceso, mismos que, afectan a la solidificación del material y a su microestructura.

Específicamente, para este caso, se tomará el mismo método para el sistema de enfriamiento utilizado por Miguel Ángel Suárez Rosales [2], en el cual se realiza un baño de inmersión directa del crisol que contiene la muestra dentro de una cámara con un flujo laminar de agua.

Para llevar a cabo el flujo de agua, se pretende que la cámara de enfriamiento tenga una entrada y una salida, por lo que tendrá que realizar su extracción desde un contenedor externo para la recirculación del fluido. Para esto, se planteó el uso de algún tipo de bomba. Debido a sus características, y a que es comúnmente utilizada para aplicaciones de elevación de líquidos a bajas alturas, se considera el uso de una bomba centrífuga de superficie. Además, resulta ser favorable para el desarrollo del proyecto pues este tipo de bombas tienen mayor disponibilidad en el mercado, y, en consecuencia, menores costos.

Por su parte, el tipo de alimentación de la bomba a escoger se planteó de corriente directa, por tiempos y costos de implementación, pues facilitará la regulación de la velocidad de funcionamiento de la bomba.

3.2.1. Dimensionamiento y material de la estructura

Se utilizarán placas planas de acrílico de espesor de 6 mm para crear un contenedor cúbico de agua en el cual se tendrá el baño de inmersión directa del crisol. El motivo de utilizar acrílico es únicamente el de poder visualizar que el flujo de agua se comporte de manera adecuada, y que se observe, así mismo, el desplazamiento del crisol dentro del sistema.

Las placas planas de acrílico, que servirán como paredes del sistema, se cortarán de tal forma que sus bordes estén dentados, con el fin de que puedan ser fácilmente ensambladas entre sí.

En la cara superior del sistema de enfriamiento es por donde será introducido el crisol proveniente del horno. Así mismo, el centro de la cara inferior del contenedor también contendrá un agujero, en el que se colocará un sello mecánico, a través del cual pasará una barra guía roscada al crisol, y permitirá su desplazamiento lineal, gracias al mecanismo colocado en la parte inferior del sistema completo. Por su parte, la función primordial de este sello mecánico será la restricción del paso del agua mientras se realice el desplazamiento de la barra.

Además, en la placa inferior se tendrán otros 2 orificios, los cuales corresponden a la entrada y salida del fluido, mismos que se encontrarán separados por una pared al interior del contenedor, la cual tendrá una altura de 5 mm menor que las paredes laterales. Esto se realiza con el objetivo de poder llenar a través de la bomba la primera parte del contenedor hasta la parte superior, y que finalmente el agua se desborde por la pared interna para salir del mismo por la segunda sección; de forma que justo al salir el crisol del sistema de calentamiento, éste pueda ser sumergido dentro del agua al entrar al sistema de enfriamiento.

Por su parte, dependiendo de la velocidad regulada de la bomba de agua, se tendrá un flujo laminar dentro del sistema de enfriamiento, lo cual es importante para la obtención de un perfil de solidificación direccional de la muestra. Para más detalles de las paredes de este sistema, se pueden consultar los planos del 3 al 8 en el Anexo 3. Se tiene como dibujo de la estructura de la cámara de enfriamiento el mostrado en la Figura 25.

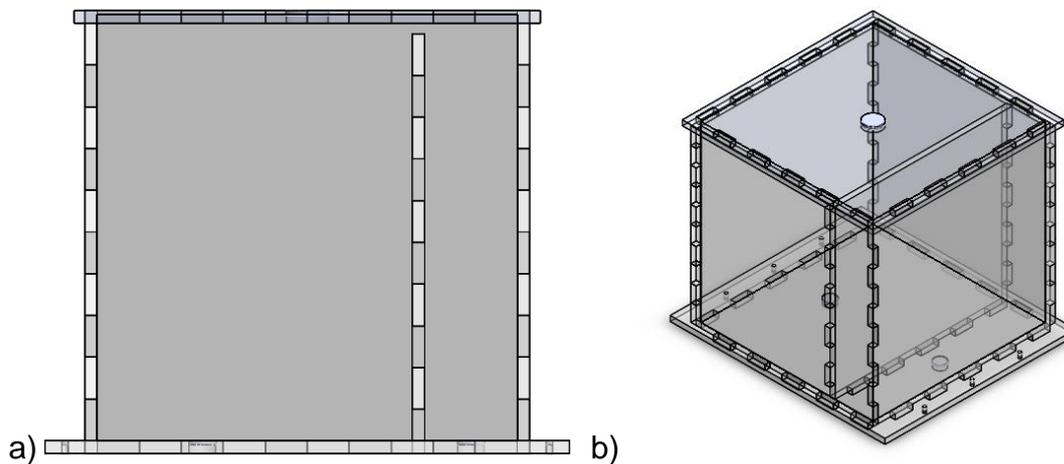


Figura 25. Contenedor de agua para el sistema de enfriamiento en vista: a) frontal b) isométrico.

3.2.2. Cálculos de flujo

Sabiendo que la zona que contendrá el líquido es un rectángulo de longitudes 150 x 200 x 195 mm se calcula su volumen.

$$V = (150)(200)(195) = 5.85 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 5.85 \text{ L}$$

Para esto se toma en cuenta el uso de una bomba de agua Yosoo con un caudal máximo a 12 V de $6.5 \frac{\text{L}}{\text{min}}$ y una manguera de entrada de diámetro de 12.7 mm. Se muestra el esquema en la Figura 26, donde A_1 es el área de la sección transversal de la manguera, Q_1 es el caudal máximo de la bomba de agua, V_1 es

la velocidad promedio de la manguera y A_2, Q_2, V_2 son el área, caudal y velocidad promedio del tubo de acrílico respectivamente.

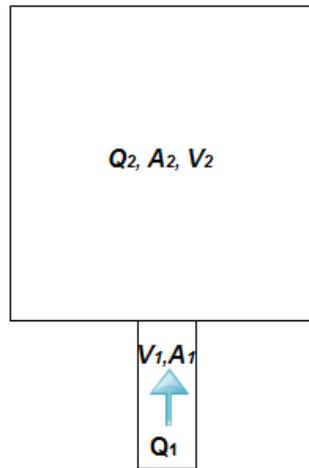


Figura 26. Esquema del contenedor.

El área de la manguera se obtiene mediante:

$$A_1 = \pi(6.35 \text{ mm})^2 = 1.2668 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Utilizando la ecuación (6) se obtiene que:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{\left(6.5 \frac{\text{L}}{\text{min}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ L}}\right)}{1.2668 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0.855 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

De la misma forma A_2 se obtiene como:

$$A_2 = (15 \text{ cm})(20 \text{ cm}) = 0.030 \text{ m}^2$$

Se utiliza la ecuación (7) para determinar V_2 , que resulta como $3.610 \times 10^{-3} \text{ m/s}$.

Utilizando la ecuación (9) para encontrar el diámetro hidráulico de un ducto rectangular con $a=15\text{cm}$ y $b=20\text{cm}$ se obtiene que:

$$D_h = \frac{2(15 \text{ cm})(20 \text{ cm})}{15 \text{ cm} + 20 \text{ cm}} = 171.43 \text{ mm}$$

Como fue descrito en el análisis del problema, el sistema de enfriamiento requiere de un flujo laminar, por lo que sabiendo que la viscosidad cinemática del agua a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ es $\nu = 1.0038 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, $V_2 = 3.610 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y $D_h = 171.43 \text{ mm}$ se utiliza la ecuación (8) para determinar el número de Reynolds:

$$Re = \frac{V_2 D_h}{\nu} = \frac{\left(3.610 \times 10^{-3} \frac{m}{s}\right) (171.43 mm)}{1.0038 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 617$$

Por su parte, tomando en cuenta que un flujo laminar ocurre cuando $Re \leq 2,300$, se obtiene que el flujo dentro del rectángulo del sistema de enfriamiento será laminar con el caudal de 6.5 L/min de la bomba.

3.2.3. Simulación de sistema de enfriamiento

Teniendo en cuenta la fórmula para saber el número de Reynolds y por lo tanto saber si es laminar o no, se realizó un cálculo para saber el rango de velocidad en el cual el flujo de agua de nuestro sistema será un flujo laminar. De (12) se toma en cuenta que un flujo laminar ocurre cuando $Re \leq 2300$, así mismo, se considera el diámetro hidráulico equivalente del contenedor de agua de 171.43 mm y la viscosidad del agua de $1.0038 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$, de lo que se obtiene que la velocidad mínima para que el flujo sea laminar sea de:

$$V_2 \leq 13.467 \times 10^{-3} \frac{m}{s}$$

Para ratificar estos datos, se introdujo esta información en la herramienta de simulación de flujo de SolidWorks®. Como parámetros iniciales se seleccionó que estuviera presente la gravedad y que el líquido que fluiría en dentro contenedor será agua a temperatura ambiente. Se prosiguió a poner los parámetros del caudal de entrada y la presión ambiental en el orificio de salida. Para esto se seleccionó el caudal máximo que puede dar nuestra bomba que es de $6.5 \frac{L}{min}$. En la simulación se configuró como meta el obtener la velocidad promedio dentro del sistema.

Una vez realizado el estudio, se obtuvo que la velocidad promedio del sistema fue de $30.9662 \times 10^{-3} \frac{m}{s}$. Esta velocidad obtenida sobrepasa nuestro rango de velocidad para ser un sistema de flujo laminar, por lo que, empíricamente se estuvo bajando el caudal en el agujero de entrada hasta $5.8 \frac{L}{min}$, caudal con el cual se llega a un flujo laminar con una velocidad promedio de $13.31961 \times 10^{-3} \frac{m}{s}$. Así que, cualquier valor igual o menor al caudal $5.8 \frac{L}{min}$ hará que el flujo en nuestro sistema sea laminar, con el cual se cumpliría con el objetivo principal planteado para este sistema. Puede observarse, a través de la Figura 27, la simulación del flujo dentro del contenedor del sistema de enfriamiento.

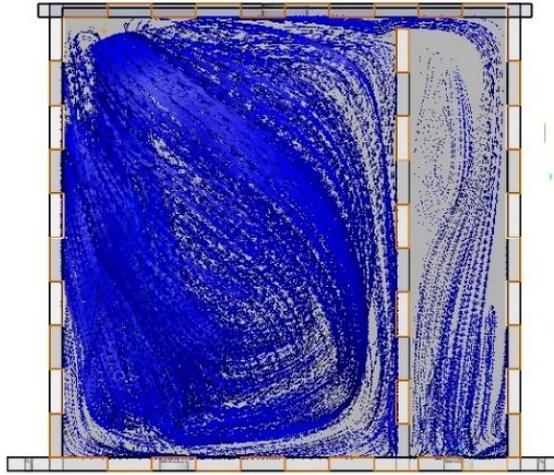


Figura 27. Simulación con caudal regulado para laminar.

3.2.4. Sello mecánico y barra guía

Como se ha mencionado anteriormente, en la parte inferior del sistema de enfriamiento deberá de colocarse un sello mecánico por el cual pase una barra guía conectada al crisol de grafito, de forma que ésta pueda deslizarse restringiendo la salida del agua del contenedor.

El diseño de este elemento se propone como un tornillo hueco que pueda roscarse con una tuerca en la parte inferior del sistema de enfriamiento, mismo que en su parte interna deberá de llevar ranuras para el acoplamiento de juntas tóricas u O-rings, que, debido a su elasticidad como material de goma, permita el deslizamiento del diámetro de la barra guía sin tener fugas de agua. Para este caso, se realizó el diseño CAD de la pieza tal como se muestra en la Figura 28, donde se observa que la pieza cuenta con cuatro muescas interiores para la colocación de O-rings con un diámetro interno de alrededor de 6 mm, así como su rosca exterior, que deberá de ser roscada a una tuerca de la medida, que en este caso se propone de 0.75 in (19.05 mm) de diámetro con paso de 10 hilos por pulgada. Para más detalles consúltese el plano 9 del Anexo 3.

De acuerdo con esto y al diámetro del crisol se considera el uso de una barra guía que deberá de ser aproximadamente del diámetro del crisol, de forma que pueda deslizarse sin complicaciones a través de este sello mecánico, así mismo, el material de esta pieza deberá de ser uno que no sea a propenso a oxidación por el contacto con agua, y que tenga un punto de fusión por arriba de los 800 °C debido a que se encontrará en contacto con el crisol que contiene la fundición.

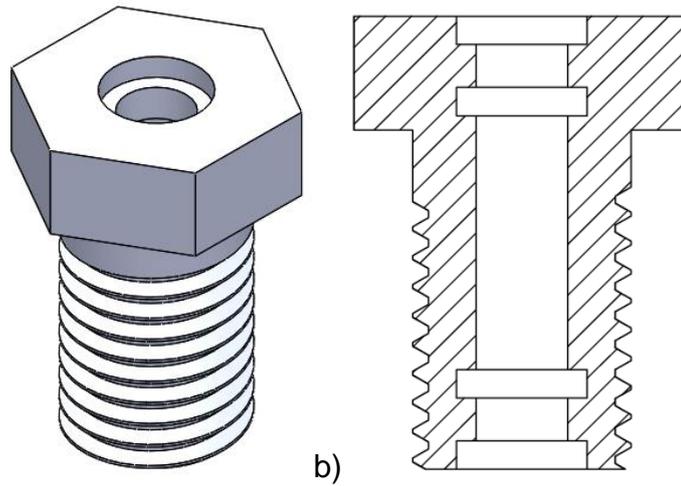


Figura 28. Diseño CAD de sello mecánico: (a) vista isométrica (b) vista seccionada.

Teniendo esto en consideración se propone el uso de una barra de latón de 0.25 in (6.35 mm) de tal forma que ajuste con el diámetro interior del O-ring, y con una longitud aproximada de 300 mm con el fin de que pueda pasar por ambos sistemas (de calentamiento y enfriamiento) sin complicaciones, como puede apreciarse en el plano 10 del Anexo 3. Se hace uso del latón por el simple hecho de que tiene un punto de fusión de 930 °C a 980 °C, así como por su facilidad de maquinado, debido a que deberá de llevar una rosca en el extremo en que se deba unir con el crisol de grafito.

3.3. SISTEMA DE MOVIMIENTO

El sistema de movimiento es encargado del desplazamiento del crisol verticalmente entre los sistemas de calentamiento y enfriamiento para poder llevar a cabo el proceso. Para ello, el sistema de movimiento se divide en dos partes. La primera parte está compuesta por una reducción de velocidad del motor comercial. La segunda parte está compuesta por un mecanismo que transforma el movimiento rotatorio, proveniente del motor y reductor de velocidad, en un movimiento lineal continuo.

En primer lugar, se propone el uso de un motor de corriente directa como fuente de movimiento rotacional, debido, en primer lugar, a que puede generar un desplazamiento suave y continuo del crisol evitando movimientos discontinuos que afecten la solidificación de los materiales para su monocristalización. Así mismo, este tipo de motores tienen por lo general un amplio rango de velocidades, lo que es favorable para poder realizar amplios estudios en el sistema Bridgman, pues se sabe que la velocidad de desplazamiento es uno de los parámetros que afectan la microestructura del material durante su solidificación. Finalmente, otro factor a considerar de este tipo de motores es que son ajustables en modo continuo y pueden ser controlables con alta precisión, lo cual es favorable para su implementación en nuestro sistema.

3.3.1.Reductor de velocidad

Por su parte, para el diseño de la transmisión de movimiento se considera que los motores de corriente directa (y generalmente, de cualquier tipo) ofrecidos en el mercado tienen una velocidad de rotación mucho mayor a la necesaria. Es por ello que deben ser implementados mecanismos para la realización de una transmisión de movimiento que permita la reducción de velocidad angular del motor, de tal forma que al transformar esa velocidad angular en lineal se asegure la obtención de una velocidad mínima de 10 $\mu\text{m/s}$.

Una de las transmisiones más sencillas y más utilizadas en las reducciones de velocidad es el uso de juegos de engranes, pues, además de que presentan una relación de velocidad e implementación sencillas, es un tipo de transmisión rígida con una muy buena eficiencia mecánica, o sea, sin pérdidas de movimiento.

Así mismo, el mecanismo sinfín-piñón puede ofrecer una gran reducción de velocidad ya que por cada vuelta completa del sinfín se obtiene únicamente el avance de un diente del piñón. Por lo tanto, la reducción obtenida por este tipo de mecanismo es igual al número de dientes que tenga el piñón. En consecuencia, su implementación permite el uso de menos componentes mecánicos, y la reducción considerable de dimensiones del sistema de transmisión.

Finalmente, para la conversión de movimiento rotacional a lineal para el desplazamiento de la muestra, se considera el uso de un mecanismo de torno-cuerda a la salida del sistema de reducción de velocidad angular, principalmente por efectos de simplicidad en su implementación sobre otros mecanismos, pues únicamente requiere de una polea con una cuerda al final del sistema de transmisión mecánica rotacional. Así mismo, este mecanismo es favorable para su acoplamiento en la barra guía, la cual, conectada al crisol, permita el desplazamiento de la muestra a través del horno y la cámara de enfriamiento.

3.3.1.1. Cálculo de la reducción de velocidad

En primera instancia, la reducción de velocidad R_v se define como la razón entre la velocidad de entrada al sistema, o bien, la velocidad angular del motor a considerar ω_m , entre la velocidad angular deseada a la salida de la transmisión ω_o :

$$R_v = \frac{\omega_m}{\omega_o}$$

Así mismo, de la ecuación (19), haciendo uso de la polea para la transmisión de movimiento rotacional a lineal, se tiene que:

$$v_o = r_p \omega_o$$

Donde r_p es el radio de la polea a utilizar y v_o es la velocidad lineal final obtenida. Ahora bien, haciendo uso de ambas ecuaciones, la reducción se obtiene de la siguiente relación algebraica:

$$R_m = \frac{\omega_m r_p}{v_o}$$



Figura 29. Motor Bringsmart JGY-2430, 12V, con reducción incluida, 3 rev/min.

De esto, se observa que ésta depende de esas tres variables únicamente, teniendo la velocidad lineal de salida definida como $10 \mu\text{m/s}$, habría que definir entonces la velocidad de entrada del motor y el radio de la polea a la salida de la transmisión. En base a consideraciones de motores comerciales de bajas revoluciones, se propone el uso del motor Bringsmart JGY-2430 (véase Figura 29) de 12 V con una velocidad nominal de 3 rev/min (o bien, 0.31416 rad/s), y de una polea con un radio de 5 mm. En base a la ecuación anterior y con estos

valores, considerando que la velocidad del motor mínima es la de 3 rpm, se obtiene que la reducción mínima a implementar en el sistema de reducción sea de 157.0796.

3.3.1.2. Elementos de transmisión de movimiento

Para la realización de esta reducción, como se ha comentado anteriormente, se propone el uso de un tornillo sinfín y piñón acoplado a juegos de engranes, de forma que pueda satisfacerse la reducción de 157.0796 calculada anteriormente.

Realizando una investigación para la obtención de un mecanismo de tornillo sinfín y piñón que fuese comercial y con medidas considerables para su implementación, se encontró uno con un piñón de 50 dientes con módulo m de 0.5 como el mostrado en la Figura 30, lo que, como se ha enfatizado anteriormente, ecuación (18), se realiza una reducción de velocidad de 50 a 1. Los diámetros interiores del tornillo sinfín y del piñón son de 5 mm y 6 mm, lo cual deberá de tomarse en consideración posteriormente para el diseño de los ejes de transmisión.



Figura 30. Tornillo sinfín y corona comercial.

Teniendo en cuenta que la reducción total es el producto de las reducciones parciales, únicamente restaría hacer una reducción en el sistema de 3.1416, que puede cubrirse con un par de engranes de 64 y 17 dientes con módulo m de 0.6 (encontrados comercialmente) mostrados en la Figura 30, los cuales, en base al uso de la ecuación (15), tienen una relación de reducción de 3.7647. Con estos valores, se obtiene que la reducción total del sistema es de 188.2353, con lo cual, se obtiene finalmente una velocidad lineal de desplazamiento de 8.3449 $\mu\text{m/s}$, cumpliéndose con la reducción para la obtención de la velocidad mínima planteada. Estos engranes de 64 y 17 dientes, por su parte, tienen diámetros interiores de 5 mm y 3.125 mm, los cuales serán de importancia para su acoplamiento en el sistema de transmisión mecánico.



Figura 31. Engranajes obtenidos comercialmente de 64 y 17 dientes.

Por otra parte, la velocidad lineal es directamente proporcional al radio de la polea de salida, por lo que, se propone que la polea tenga dos diámetros distintos, con el fin de obtener un rango de velocidades aún más amplio y pueda ser utilizado para amplios estudios de muestras en el sistema de solidificación unidireccional tipo Bridgman. Así mismo, se considera que sea roscado cada nivel, de modo que la cuerda vaya siguiendo una guía al enrollarse y evitar el empalmado sobre sí misma en cada vuelta.

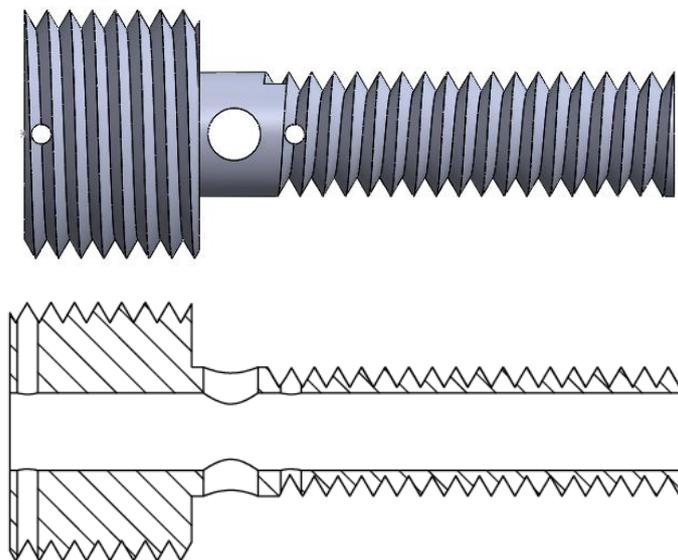


Figura 32. Diseño en CAD de la polea roscada: (a) Vista lateral (b) Vista seccionada lateral.

En la Figura 32 se observa el dibujo en Solidworks® de la pieza propuesta con una vista de sección, donde sus radios de rosca internos son de 5 mm y 10 mm, y un diámetro al interior a lo largo de la pieza de 6 mm, para su acoplamiento en el mismo eje de la corona que ensambla con el tornillo sinfín. Véase que cuenta con su orificio para el inserto de un opresor para su acoplamiento a un eje en el sistema de transmisión, así como de los orificios para el amarre de la cuerda a

utilizar (de diámetro menor a 1 mm). Para esta pieza se considera el uso de una aleación de aluminio 6061, por su disponibilidad en el mercado, además de que es un material con buena resistencia a la corrosión y una excelente maquinabilidad. Para más detalles de la misma, puede consultarse en el plano 11 del Anexo 3.

3.3.2. Diseño de transmisión mecánica

Para el diseño del acomodo de los componentes para la caja de transmisión de movimiento, se tomarán en cuenta las dimensiones de los elementos con el fin de realizar un acomodo lo compacto posible. Por su parte, se considera el uso de ejes y rodamientos del mismo diámetro de 5 mm; para esto, se eligieron cuidadosamente los componentes comerciales, de modo que el tornillo sinfín, su piñón, la polea mostrada anteriormente, así como un engrane tuvieran un diámetro interno de 5 mm o 6 mm, con sus respectivos opresores para evitar el movimiento libre de los mismos respecto al eje. El piñón de 17 dientes, por otro lado, se acoplará directamente al motor con un tornillo M3x0.5.

Teniendo en cuenta esto, y conociendo los elementos contenidos en el sistema, se sabe que en paralelo al eje del motor se colocará el primer eje de transmisión, el cual contendrá al engrane de 64 dientes. Considerando $N_1=17$, $N_2=64$ y $m=0.6$, este eje estará a una distancia del centro del eje del motor de 24.3 mm de acuerdo con la ecuación (17).

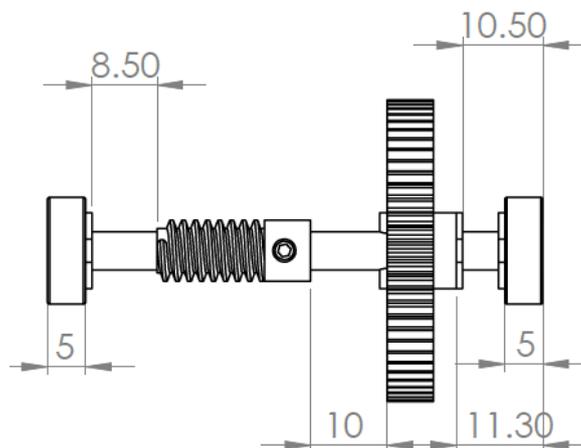


Figura 33. Medidas principales de la estructura del primer eje de transmisión.

Así mismo, el eje contendrá un rodamiento a cada extremo, al engrane de 64 dientes (el cual ensambla con el piñón de 17 dientes), y al tornillo sinfín acomodados de la forma en que se muestra en la Figura 33. Debido al acomodo de los componentes se considera que la longitud del eje sea de 64.6 mm; para más detalles del eje así como de su ensamble consúltense los planos 12 y 14. Del plano 12 se puede observar que el eje cuenta con 3 muescas de 0.5 mm a lo largo del eje para la colocación de anillos opresores, con el fin de evitar el

movimiento longitudinal del eje a través de las paredes en que tenga como soportes, así mismo, para evitar el movimiento del engrane a lo largo del eje. Así mismo, se cuenta con una perforación en el eje por la cual pasará una barra de acero para restringir el movimiento giratorio del engrane, pues este elemento mecánico no cuenta con un opresor para este fin, a diferencia de los demás elementos.

Por otra parte, el segundo eje de transmisión mostrado en la Figura 34 contiene la corona que ensambla con el tornillo sinfín, la polea diseñada previamente, así como sus rodamientos correspondientes a los extremos. Las distancias tomadas en los espacios son principalmente para el adecuado ensamble entre el tornillo sinfín y el piñón, con lo que la longitud propuesta de este eje es de 110 mm. Este eje, considerando el diámetro de paso del tornillo D_1 como 7 mm y el de la corona D_2 como 25 mm (de acuerdo con los datos suministrados por el proveedor), y haciendo uso nuevamente de la ecuación (17) se colocará a una altura de 16.2 mm sobre el centro del eje anterior. En los planos 13 y 15 del Anexo 3 se pueden consultar las dimensiones del segundo eje de transmisión, así como el acomodo de los componentes sobre el mismo. Por su parte, del plano 13 puede observarse que el eje de transmisión 2 cuenta a los extremos con cambios de diámetro a 5 mm para su acoplamiento con los rodamientos y para la restricción de movimiento del mismo.

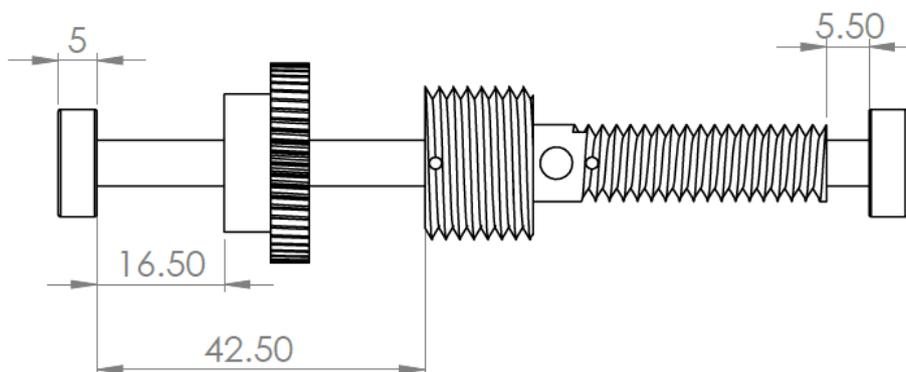


Figura 34. Medidas principales de la estructura del segundo eje de transmisión

En base al diseño de estos ejes y tomando en cuenta las distancias entre centros calculadas anteriormente, se propone una estructura de paredes rectangular que soporte los ejes de transmisión, así como la colocación y atornillamiento del motor propuesto. Cabe decir que los agujeros en los cuales son colocados los rodamientos tienen un diámetro de 14 mm, debido al diámetro exterior de los mismos, y tienen únicamente la profundidad necesaria para que entren, que, de acuerdo con los proveedores, tienen un espesor de 5 mm. Además, en estas paredes se consideran los orificios con los cuales se atornillarán entre sí las paredes. Las caras principales de las paredes diseñadas se muestran en la Figura 35, y su ensamble en la Figura 36. Para más detalles de estas paredes y de su ensamble consúltense los planos 16 al 20 del Anexo 3.

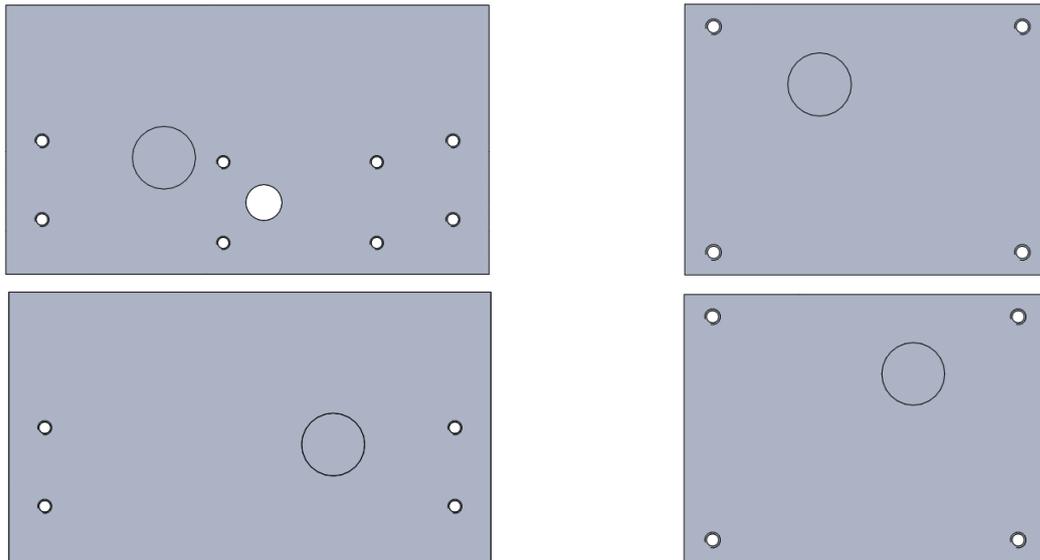


Figura 35. Vistas principales de las caras del soporte del sistema de transmisión de movimiento.

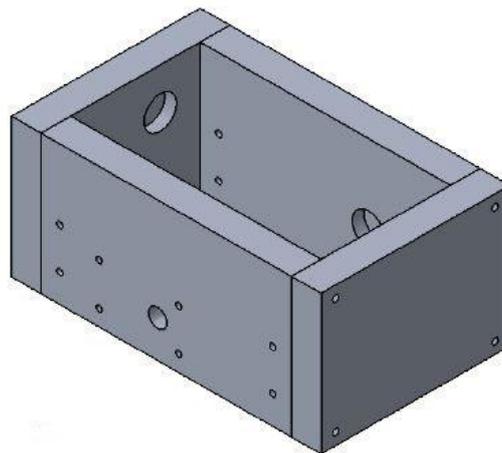


Figura 36. Ensamble de las paredes laterales del sistema de transmisión de movimiento.

Finalmente, se realiza a través de SolidWorks® el ensamble de los componentes del sistema de transmisión mecánica, así como de las paredes, comprobando su adecuado acoplamiento y comprobando la inexistencia de interferencias entre elementos. En la Figura 37 se muestran las vistas superior (a), inferior (b) e isométrica (c) del sistema ensamblado.

Cabe decirse que la fuerza aplicada para el desplazamiento de la muestra, así como los esfuerzos debido al contacto entre los dientes del sinfín- piñón y los engranes debido a las fuerzas de rozamiento, son consideradas despreciables para un análisis estático, por lo que la elección de los materiales para los ejes de transmisión resulta ser indiferente, aunque se propone el uso de un acero al carbono 1018, por su disponibilidad en el mercado. Así mismo, el material de las paredes en los cuales se colocarán los rodamientos se considera que sea de aluminio 6061, por su disponibilidad, así como la facilidad de maquinado que éste representa.

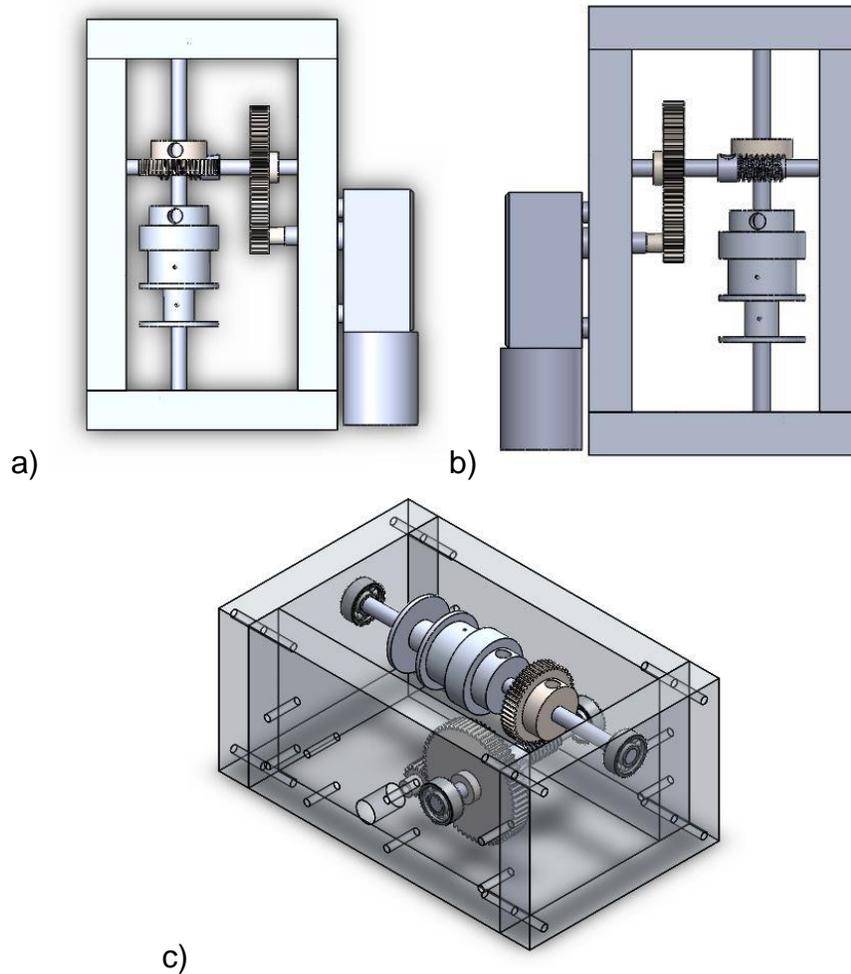


Figura 37. Vistas (a) superior, (b) inferior, e (c) isométrica del ensamble del sistema de transmisión de movimiento.

3.3.3. Simulación mecánica

El objetivo principal de esta simulación es el validar que se cumplan los cálculos de reducción realizados previamente para este sistema. Para esto, se realiza un estudio de movimiento para la simulación, gráfico y obtención de datos mediante el uso de SolidWorks®.

Para la configuración del ensamble, previo a la realización del estudio de movimiento, se realizan las relaciones de posición mecánicas para el par de engranes de entrada y para el tornillo sinfín y su corona, de modo que se simule el comportamiento de la relación entre esos componentes de transmisión mecánica.

Dentro de las opciones del análisis de movimiento se coloca un motor giratorio de 3 rpm a la entrada del sistema, y se configuran los parámetros para el trazado de un gráfico de

la velocidad angular medida en el diámetro interior de la polea. Una vez obtenidos los datos se realiza el dibujo del gráfico como se muestra en la Figura 38. Véase que debido a la alta resolución de las soluciones del estudio de movimiento se tiene un gráfico con muchos picos, sin embargo, puede verse que son mínimos, prácticamente despreciables, y convergen en un promedio de $9.5625 \times 10^{-2} \text{deg/s}$, que, realizando la conversión a rad/s y multiplicándolo por el diámetro de 5 mm se obtiene una velocidad lineal de $8.3448 \mu\text{m/s}$. Con lo cual se comprueban los cálculos efectuados de la reducción para la transmisión de velocidad del sistema de movimiento.

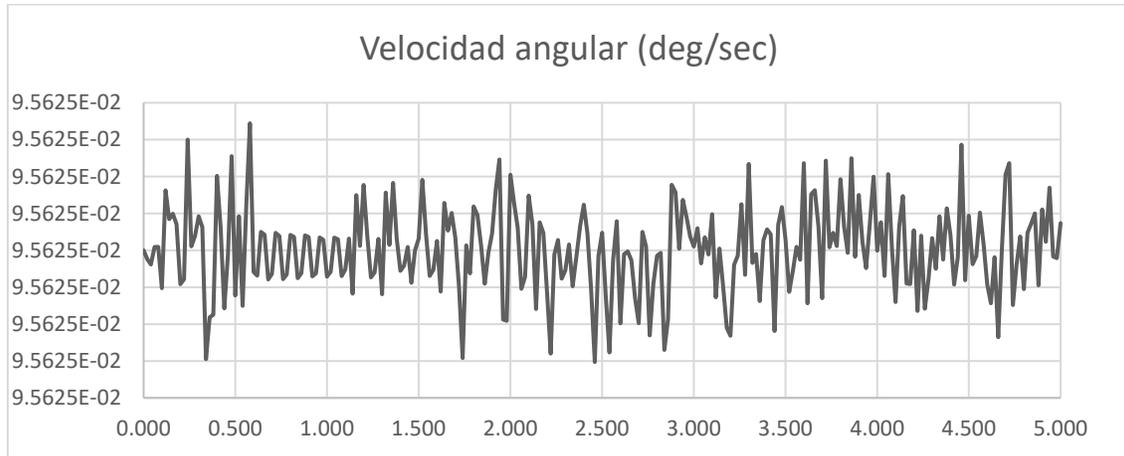


Figura 38. Gráfico obtenido del estudio de movimiento en SolidWorks® del comportamiento de la velocidad angular en la polea.

3.4. ESTRUCTURA Y SISTEMA ACOPLADO

A partir de las dimensiones de los diferentes sistemas se diseñó una estructura en la cual se soportarán todos los sistemas del proyecto. A partir de los diseños ya realizados se tomaron en cuenta los siguientes volúmenes que ocuparan de espacio cada uno de los sistemas: el sistema de calentamiento ocupa un cilindro de 164.08 mm de diámetro y 254.4 mm de alto, el sistema de enfriamiento ocupa un prisma rectangular de (alto x largo x ancho) 222 x 250 x 212 mm y el sistema de movimiento ocupa un prisma rectangular de 50 x 132.4 x 80.7 mm.

La estructura se realizará con acero de perfil tubular cuadrado de 0.75 in (19.05 mm), así mismo, se propone que sus elementos deberán de encontrarse soldados, para dotar de rigidez a las uniones. Tomando en cuenta las dimensiones especificadas anteriormente, se realizó el diseño de una estructura de tres espacios para cada uno de los sistemas en específico, y en base a esto se dejaron los volúmenes de cada sección con un margen con respecto a los volúmenes ocupados por los sistemas.

Partiendo de esto, se determinó que cada sección quedaría con el siguiente orden y con las siguientes dimensiones: el sistema de calentamiento en un tercer nivel con un volumen (alto x largo x ancho) de 232.59 x 250 x 210 mm, el sistema de enfriamiento en el segundo nivel con un volumen definido por 218.79 x 250 x 210 mm y el sistema de movimiento en el primer nivel con 418.79 x 250 x 210 mm. Se dejó la altura de 418.79 mm en la última sección para efectos de desplazamiento de la barra de latón en la parte inferior de la cámara de enfriamiento.

Por otra parte, a un lado del nivel correspondiente al del horno, se propone colocar otra plataforma de 250 mm de largo por 200 mm de ancho para la colocación de una caja que contenga los circuitos eléctricos y electrónicos necesarios para el accionamiento, protección, control y monitoreo del sistema.

Se consideró para cada piso de la estructura el utilizar lámina de acero calibre 16 remachada sobre los perfiles tubulares cuadrados, con el fin de sostener cada uno de los sistemas. En cuanto a las dimensiones y diseños de esta estructura como la caja de control se pueden consultar en los planos 21 y 22 del Anexo 3.

A continuación, se muestran en la Figura 39 los dibujos en SolidWorks® de la estructura y los sistemas ya acoplados dentro de la estructura:

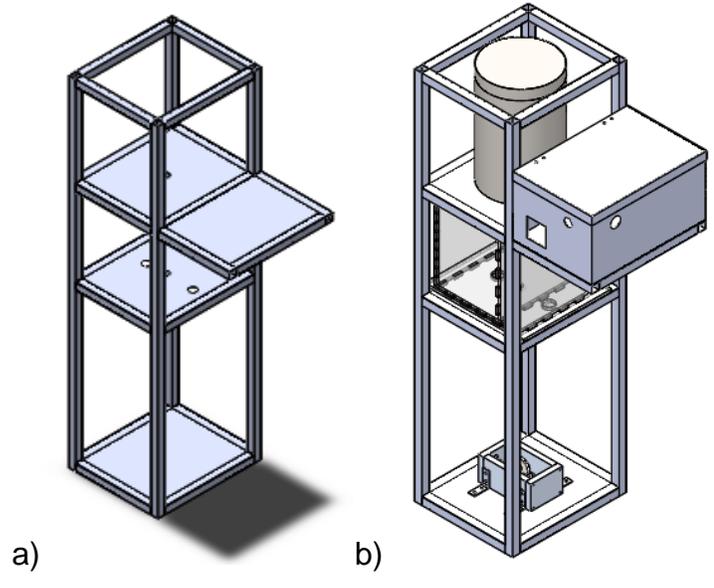


Figura 39. a) Esqueleto de estructura completa b) Sistema Bridgman acoplado.

3.5. ELEMENTOS Y ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ

Para el diseño de la interfaz hombre-máquina se analizaron las opciones que podrían satisfacer los requerimientos necesarios para la operación del usuario con el dispositivo Bridgman. Para ello se eligió una interfaz gráfica, debido al requerimiento de manejo de datos del usuario. También, fue considerada esta opción al presentar ventajas sobre la implementación de una interfaz física, donde la interfaz virtual presenta facilidad de implementación, programación y almacenamiento de datos.

Se realizó una interfaz gráfica en LabVIEW®, en la cual se tomó en cuenta los aspectos necesarios para la manipulación, y monitoreo de los parámetros requeridos por el usuario para el funcionamiento del sistema Bridgman. La interfaz permite mostrar la temperatura de la muestra contenida en el crisol mediante el uso de 2 termopares, seleccionar la polea deseada, ajustar la velocidad del motor, ajustar el caudal de la bomba, y el encendido y apagado de la bomba de agua, del motor y de la lectura de cada uno de los termopares.

En base a estas características se realizó la interfaz mostrada en la Figura 40. En cuanto a la programación, se planea la obtención de los datos de temperatura del crisol con un periodo de muestreo de un segundo, datos que se guardarán en un archivo de Excel al finalizar la ejecución del programa. La temperatura de la resistencia eléctrica no se considera dentro de la interfaz realizada en LabVIEW®, ya que esta se manipulará a través del controlador de temperatura.

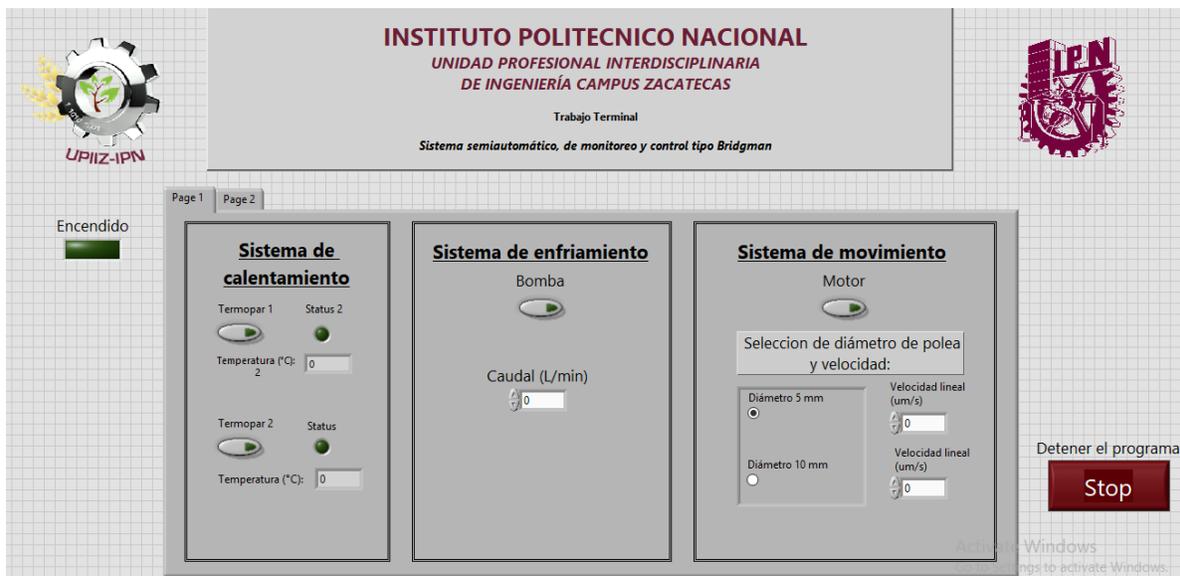


Figura 40. Interfaz gráfica en LabVIEW®.

3.6. DISEÑO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

El sistema de calentamiento, enfriamiento y movimiento requieren de componentes eléctricos y electrónicos para realizar sus diversas actividades. A continuación, se muestran los componentes necesarios para cada uno de los sistemas.

3.6.1. Sistema de calentamiento

El sistema de calentamiento posee un control de temperatura, el cual será realizado mediante un controlador de temperatura comercial modelo REX-C100FK02-V*AN. El tipo de control utilizado por dicho componente es el PID, donde los parámetros proporcional-integral-derivativo son ajustados automáticamente por el controlador. El rango de temperaturas bajo el que puede trabajar el dispositivo es de 0 a 999°C. La razón de utilizar un controlador comercial para el control de temperatura es por su fácil implementación, ajuste y manipulación en cualquier sistema térmico, así mismo, esto permite que pueda operarse el sistema de calentamiento de forma independiente a los demás sistemas, y que sea de utilidad en la fundición de muestras para otros fines y estudios. A su vez, el precio de estos controladores de temperatura suele ser muy económico.

La entrada del controlador cuenta con un termopar tipo K con aislamiento mineral, con rango de funcionamiento de -40 a 1000°C. El termopar permitirá sensor la temperatura de la resistencia eléctrica para así poder observar la temperatura real y poder crear el lazo de control. Dicho termopar no necesita una etapa de acondicionamiento de señal ya que el controlador la proporciona.

El controlador necesita a su salida una etapa de potencia que permita mandar la señal de control hacia la resistencia eléctrica. La etapa de potencia elegida es el uso de un relevador de estado sólido, el cual permite una corriente máxima de 40 A, una entrada de voltaje de 3-32V de corriente directa, y una salida de voltaje de 24-380V de corriente alterna.

De manera general, el diagrama del sistema de control para el sistema térmico se observa en la Figura 41.

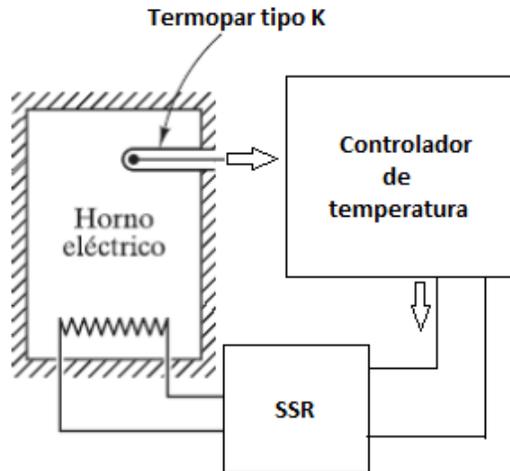


Figura 41. Diagrama del sistema de control para el sistema térmico.

El diagrama eléctrico de los componentes necesarios para el control de temperatura se muestra en la Figura 42.

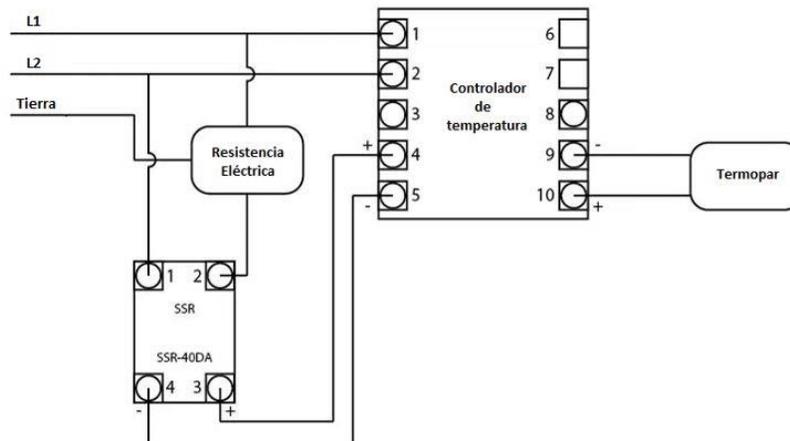


Figura 42. Diagrama eléctrico del control de temperatura.

El sistema de calentamiento debe ser capaz de monitorear la temperatura de la muestra, que se encuentra dentro del crisol. Para ello, como se mencionó en la sección 3.1.7, se realizará la fabricación de termopares tipo K con alambres cromel y alumel de calibres de 20 a 24.

Se desea que el sistema pueda realizar mediciones periódicas de la temperatura de la muestra en un punto específico, con el fin de obtener, al final del proceso, un perfil de solidificación de la muestra. Para ello, es necesario el uso de un dispositivo de control electrónico. Ya que el sistema de calentamiento posee una respuesta lenta y no es

necesario la medición y monitoreo en tiempo real de la temperatura, se opta por el uso de un Arduino® Mega, al ser más económico y cumplir con las necesidades del sistema.

El alambre de termopar tipo K necesita un acondicionamiento de su señal, pues el voltaje máximo que proporciona a 800°C se encuentra alrededor de 33 mV. Actualmente existen módulos económicos de acondicionamiento de señal para termopar. Para realizar el acondicionamiento de señal se utilizará el módulo Max 6675, el cual permite amplificar, compensar y convertir de analógico a digital la señal generada por el termopar tipo K, siendo compatible con la comunicación SPI.

Los pines para la comunicación SPI en el Arduino® Mega se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9. Pines referentes a la comunicación SPI de Arduino®.

Modelo Arduino®	MOSI	MISO	SCK	SS Slave	SS Master
Mega	51, ICSP-4	50, ICSP-1	52, ICSP-3	53	Z

De la hoja de datos del módulo Max 6675 se obtiene el esquema de la Figura 43 en el que se muestran los pines de conexión. Donde SO, CS y SCK, pines de la comunicación SPI deben ser conectados a los pines 50, 51 y 52 (MISO, MOSI, SCK) del Arduino® Mega. Los pines T- y T+ son conectados al termopar tipo K, donde T- es conectado al alambre de Alumel (-) y T+ al alambre de Cromel (+). El módulo Max 6675 puede ser alimentado con un voltaje entre 3 a 5.5 V por lo cual se escoge un voltaje de 5V, tomado directamente del Arduino Mega para alimentar a dicho módulo.

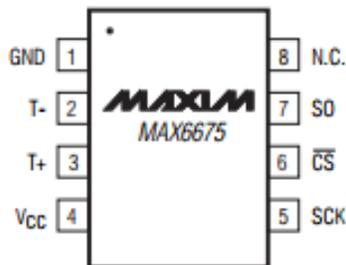


Figura 43. Esquema del módulo Max 6675.

La conexión entre el Arduino® Mega, el módulo Max 6675 y el termopar se muestra en la Figura 44.

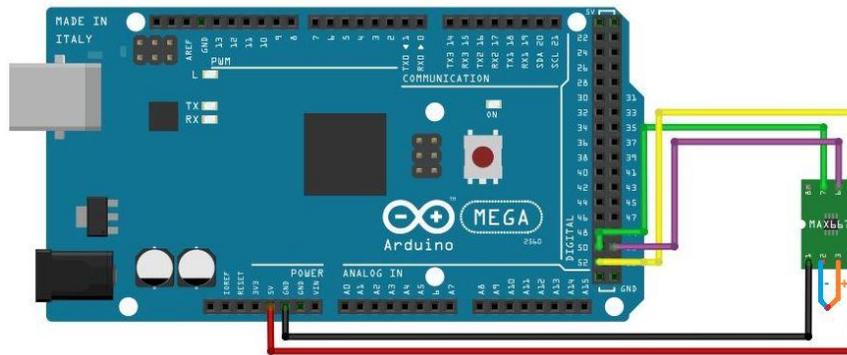


Figura 44. Conexión entre un Arduino® Mega y el módulo Max 6675.

3.6.2. Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento requiere el uso de una bomba para la recirculación del agua. La bomba Yosoo es de 12 V, 500 mA y caudal máximo de 6.5 Litros/min. Sin embargo, se desea regular el caudal de la bomba según las especificaciones del usuario. La bomba de agua a utilizar posee un motor de corriente directa, por lo cual variando el voltaje de entrada al motor se puede variar la velocidad de rotación de la bomba, la cual, de acuerdo con la ecuación (14), varía en proporción directa al caudal de salida de la bomba.

La velocidad de la bomba se regulará mediante el uso del Arduino® Mega por modulación por ancho de pulso (PWM), la cual es una técnica ampliamente usada para modificar la cantidad de energía que se suministra a una carga.

Sin embargo, los pines digitales de Arduino® permiten una corriente cercana a 40 mA, y como fue especificado, la bomba a utilizar requiere una corriente máxima de 500 mA. Debido a ello, debe ser amplificada la corriente emitida por el Arduino®, para lo cual existen distintas formas, como el uso de un transistor, o el uso de un driver como el L293 o L298. Cualquier de los ejemplos mencionados cumple con los requerimientos de potencia de la bomba de agua, pero se busca una solución robusta que evite el cambio periódico de componentes debido a picos de corriente que puedan dañar los circuitos amplificadores. Bajo esta condición, se elige el módulo Monster Moto Shield para realizar esta tarea, el cual se basa en circuitos integrados VNH2SP30, permitiendo controlar dos motores de corriente directa hasta de 14 A de forma continua (picos de hasta 30 A). El VNH2SP30 está diseñado para aplicaciones automotrices, por lo que es adecuado para el manejo de motores en ambientes difíciles.

El módulo Monster Moto Shield fue diseñado para ser montado sobre un Arduino® Uno, por lo cual, posee los mismos pines. Sin embargo, ya que se utilizará un Arduino® Mega, los pines a utilizar del módulo son los mostrados en la tabla siguiente (Tabla 10):

Tabla 10. Pines del módulo Monster Moto Shield.

Nombre	Descripción
Vcc	Fuente de alimentación
GND	Tierra
A0	Enable motor 1
A1	Enable motor 2
A2	Sensor de corriente motor 1
A3	Sensor de corriente motor 2
D7	Sentido horario motor 1
D8	Sentido anti horario motor 1
D4	Sentido horario motor 2
D9	Sentido anti horario motor 2
D5	PWM motor 1
D6	PWM motor 2

El módulo posee también los pines de salida del motor 1 (A1, B1) y del motor 2 (A2, B2), así como dos pines para la alimentación de los motores.

Los pines de salida del motor 1 serán conectados a la bomba de agua, y los pines de salida del motor 2 serán conectados al motor de corriente directa acoplado en el sistema de movimiento. La conexión entre la bomba de agua, el módulo Monster Moto Shield y el Arduino® Mega se muestran en la Figura 45:

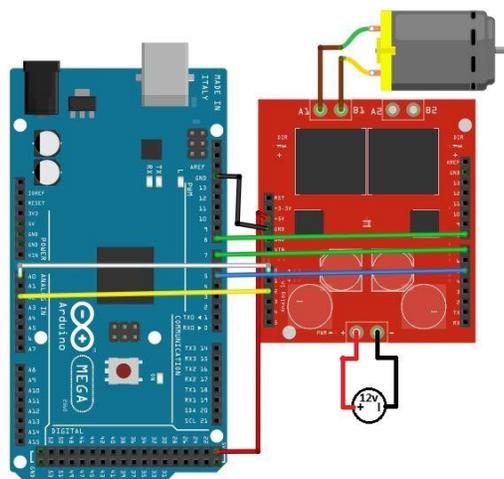


Figura 45. Conexión entre la bomba de agua y Arduino® Mega.

3.6.3. Sistema de movimiento

Al igual que en la bomba de agua del sistema de enfriamiento, el motor Bringsmart JGY-2430 de 12 V requiere una etapa de potencia para poder manipular el motor desde el Arduino®, por lo cual, se utilizará también la técnica de PWM y el módulo Monster Moto Shield para realizar dicha tarea. La conexión entre el motor de corriente directa, el Arduino® y el módulo Monster Moto Shield se muestra en la Figura 46:

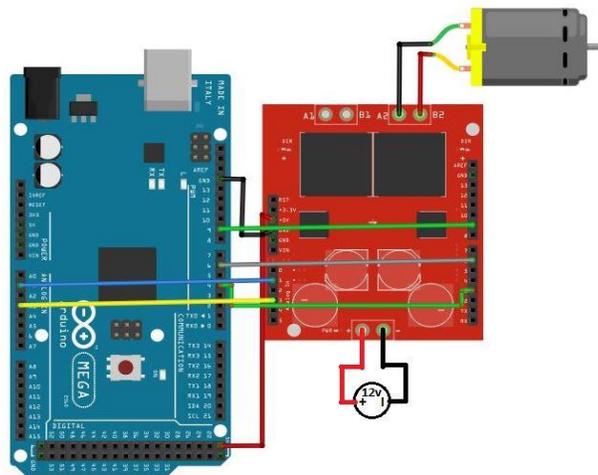


Figura 46. Conexión entre el motor de corriente directa y Arduino® Mega.

Para el ajuste de la velocidad del motor de corriente directa, se realizarán mediciones de velocidad en base al voltaje suministrado, con lo que posteriormente se generará una curva de voltaje vs velocidad la cual será implementada en el programa. Por su parte, se aplicará el mismo método para el ajuste del caudal de salida de la bomba.

3.6.4. Sistema de alimentación

El sistema de enfriamiento hace uso de una bomba de agua, la cual tiene un consumo máximo de 500 mA utilizando una alimentación de 12 V. Por otro lado, el sistema de movimiento hace uso de un motor de corriente directa de 12 V, donde su consumo sin carga es de 90 mA, y a eficiencia máxima con un torque de 35 Kg·cm el consumo es de 180 mA. Para estos requerimientos de corriente se propone el uso de una fuente de alimentación conmutada de 12 V, 10 A, la cual puede suministrar la corriente necesaria para la adecuada operación de los sistemas de enfriamiento y movimiento.

El sistema de alimentación, en consecuencia, está dividido en dos partes. Una parte está compuesta por la alimentación del sistema de calentamiento, y la otra por el sistema de enfriamiento y movimiento.

Teniendo en cuenta esto, se utilizará una red eléctrica trifásica para alimentar todos los sistemas. El sistema de calentamiento será conectado a dos fases (L1 y L2) para obtener un voltaje de 220 V. La fuente de alimentación conmutada, encargada de alimentar los sistemas de enfriamiento y movimiento, será conectada a una fase (L3) de 127 V. En la Figura 47 se muestra un diagrama general de la alimentación de los sistemas

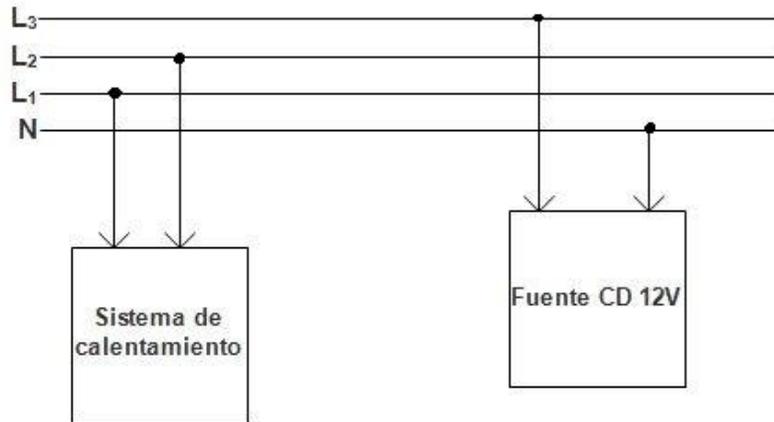


Figura 47. Esquema de la alimentación trifásica a los sistemas.

Por su parte, se propone la implementación del siguiente circuito de protección, mostrado en la Figura 48. La alimentación trifásica se obtendrá de una clavija 30 A 250V NEMA® L 15-30, donde las tres fases serán conectadas a un interruptor termomagnético modelo FN83CE20 BTDIN, el cual tendrá la función de proteger el sistema, abriendo el circuito si se supera una corriente de 20 A. Las fases conectadas a las salidas del interruptor termomagnético serán conectadas a un contactor TOCT1-63 TOMZN junto con el Neutro de la clavija, donde la bobina de activación del contactor se conectará a 220V utilizando un interruptor normalmente abierto (NA) de 10 A para el encendido/apagado del sistema y un botón de paro de emergencia normalmente cerrado (NC) de 10 A.

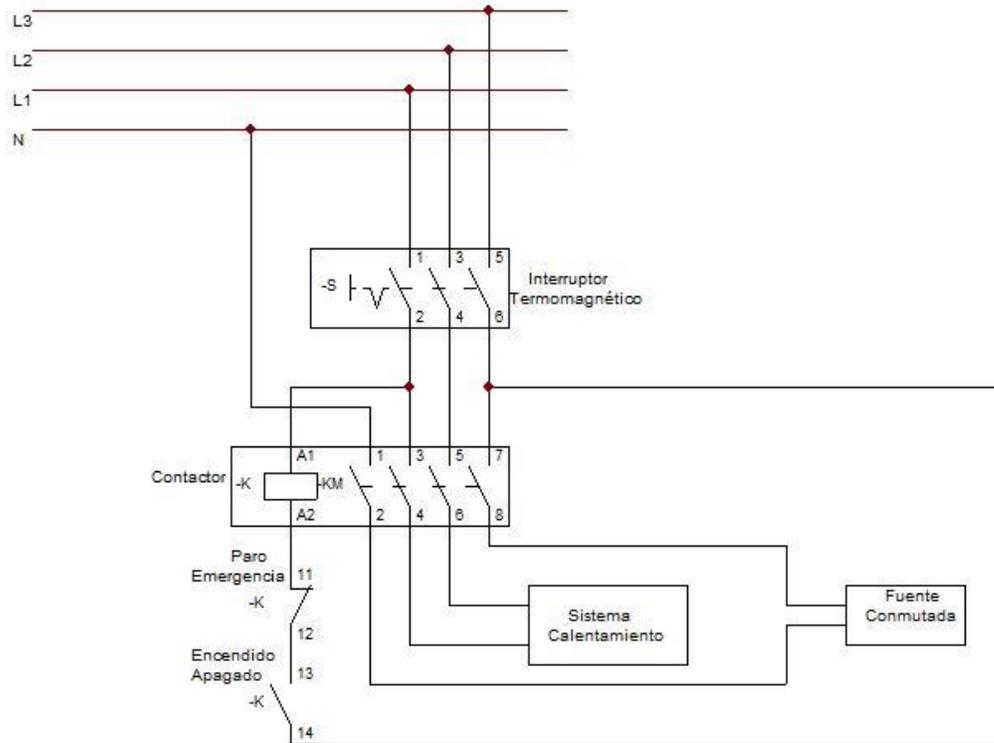


Figura 48. Circuito eléctrico de alimentación y protección del sistema.

Se realizó la simulación del circuito de protección con una carga resistiva mediante el software CADe SIMU, observando su correcto funcionamiento.

CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

4.1. SELECCIÓN FINAL Y COTIZACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES

A partir de los diseños propuestos de cada uno de los sistemas se eligieron los siguientes componentes, mostrados en la Tabla 11 que cumplen con las especificaciones mencionadas durante el análisis y diseño del proyecto. En la Tabla 11 se puede observar la selección de componentes y cotización de cada sistema.

Tabla 11. Selección y cotización de componentes comerciales.

Cantidad	Artículo	Precio Unitario	Precio total
1 Pieza	Tubo de alúmina 2.5 in 23cm	\$ 1268.74	\$ 1268.74
4 Piezas	Ladrillo refractario rectangular	\$ 17.60	\$ 70.40
1 Pieza	Mortero Lata 8 Kg.	\$ 115.80	\$ 115.80
1 Pieza	Buje de grafito 55 mm 23cm	\$ 2,164.33	\$ 2,164.33
1 Pieza	Fibra cerámica 1m x 1m x 1in	\$ 367.00	\$ 367.00
1 Pieza	Block de conexiones cerámico	\$ 150.00	\$ 150.00
2 Metros	Alambre para termopar tipo K Cal. 20	\$ 70.00	\$ 140.00
1 Pieza	Termopar tipo K	\$ 116.82	\$ 116.82
1 Pieza	Disipador para SSR	\$ 38.06	\$ 38.06
5 Piezas	Resistencia Kanthal 2000W 220V	\$ 48.66	\$ 325.70
		Total	\$ 4,756.85
1 Pieza	Bomba de agua 12 V	\$ 412.00	\$ 412.00
7 Piezas	Acrílico 6 mm 22x22cm con corte láser	\$ 103.45	\$ 840.01
5 Metros	Manguera 1/2 in	\$ 9.05	\$ 45.25
2 Piezas	Válvula esférica en CPVC de 1/2 in	\$ 44.83	\$ 89.66
1 Pieza	Pegamento P/PVC azul 4 oz.	\$ 54.74	\$ 54.74

1 Pieza	Tubo CPVC 1/2 in	\$ 14.66	\$ 14.66
2 Piezas	Empaques	\$ 8.19	\$ 16.38
1 Pieza	Surtido de o-rings	\$ 19.40	\$ 19.40
4 Piezas	Adaptador hembra para insertar 1/2 in	\$ 5.60	\$ 22.40
1 Pieza	Adaptador hembra 1/2 in CPVC-CTS	\$ 5.17	\$ 5.17
1 Pieza	Reducción Bushing PVC 1x1/2 CXR	\$ 11.64	\$ 11.64
1 Pieza	Cinta teflón	\$ 15.09	\$ 15.09
0.242 Kg	Barra aluminio 6061 1 in	\$ 118.23	\$ 28.61
1 Pieza	Tuerca Hex 3/4-10 10P	\$ 18.53	\$ 18.53
		Total	\$ 1,593.54
1 Pieza	Motor JGY-2430 12V 3 RPM 90mA 35 Kgcm	\$ 635.08	\$ 635.08
1 Pieza	Tornillo sinfín y corona de 50 dientes	\$ 399.37	\$ 399.37
10 Piezas	Balero 5 x 14 x 5 mm	\$ 6.22	\$ 62.22
0.110 Kg	Barra de acero 1018 cold rolled 5/16 in	\$ 43.24	\$ 4.76
0.137 Kg	Barra de latón de 1/4 in	\$ 184.86	\$ 25.33
1 Pieza	Engranés 64 dientes y 17 dientes	\$111.07	\$111.07
1.70 kg	Solera de aluminio 6061 12x4 in	\$ 114.00	\$ 193.80
		Total	\$ 1,431.63
8.50 Kg	Perfil tubular C075 C-18	\$21.98	\$ 186.85
9 Kg	Lámina R. F. Cal. 18	\$ 19.95	\$ 179.61
1 Pieza	Escuadra de unión veker 2x2 galv.	\$ 63.79	\$ 63.79
1 Pieza	Escuadra de unión 1 1/2x1 1/2 gal.	\$ 46.55	\$ 46.55
5 Piezas	Tornillería	\$ 18.66	\$ 93.30
1 Litro	Pintura Comex 100 negro	\$ 123.28	\$ 123.28

0.500L	Thinner Comex estándar	\$ 15.09	\$ 15.09
1 Pieza	Unirapid Express jeringa epóxica	\$ 46.98	\$ 46.98
1 Pieza	Sellador Total Tech transparente	\$84.91	\$84.91
		Total	\$ 840.36
1 Pieza	Módulo Monster Moto Shield	\$ 174.11	\$ 174.11
2 Piezas	Módulo Max 6675	\$ 176.00	\$ 352.00
1 Pieza	Controlador de temperatura y SSR	\$ 425.00	\$ 425.00
1 Pieza	Fuente de voltaje 12V 10 ^a	\$ 275.57	\$ 275.57
1 Pieza	Contactador 4P 63A TOMZN	\$ 264.65	\$ 264.65
1 Pieza	Interruptor termomagnético 3P	\$ 379.00	\$ 379.00
1 Pieza	Botón paro de emergencia 10A	\$ 22.11	\$ 22.11
1 Pieza	Interruptor 10 ^a	\$ 87.25	\$ 87.25
3 Metros	Extensión USB	\$ 69.22	69.22
1 Pieza	Clavija 30A 250V NEMA® L 15-30	\$ 209.49	\$ 209.49
3 Metros	Cable Vinanel XXI 600v cal. 10	\$ 11.01	\$ 33.04
6 Metros	Cable Vinanel XXI 600v cal. 8	\$17.76	\$ 106.56
		Total	\$ 2,398.00
2 Piezas	Disco abrasivo 4-1/2X.040X7/8	\$ 37.84	\$ 75.68
1 Pieza	Disco desbaste metal	\$ 54.31	\$ 54.31
1 Pieza	Brocha	\$ 14.22	\$ 14.22
		Total	\$ 144.21
		Suma Total	\$ 11,164.59

La suma total no considera el IVA generado por la compra y facturación de los componentes. Se considera una cantidad de **\$ 12,000.00** tomando en cuenta el IVA.

4.2. SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

En este apartado se especifica la implementación del sistema eléctrico utilizado para el funcionamiento de los sistemas de calentamiento, enfriamiento y movimiento. Por lo tanto se abordan tres puntos importantes para el desarrollo del sistema: distribución de componentes, conexión final entre los componentes y construcción de la caja de control.

En la Figura 49 se muestra la distribución y conexión de los componentes, la cual fue realizada de forma que los componentes estuvieran agrupados y cercanos a los dispositivos a los que fueran conectados. Los componentes montados sobre la base son:

1. Interruptor termomagnético 3P FN83CE20 BTCINO 20A.
2. Contactor 4P 63A TOMZN.
3. Fuente de voltaje 12V 10A.
4. Arduino® Mega 2560.
5. Módulo Monster Moto Shield.
6. Controlador de temperatura REX-C100.
7. Relevador de Estado Sólido (SSR) 40A Fotek.
8. Módulo Max 6675.
9. Botón de encendido 220V 10A NA
10. Botón de paro de emergencia 220V 10A NC.
11. Ventilador.

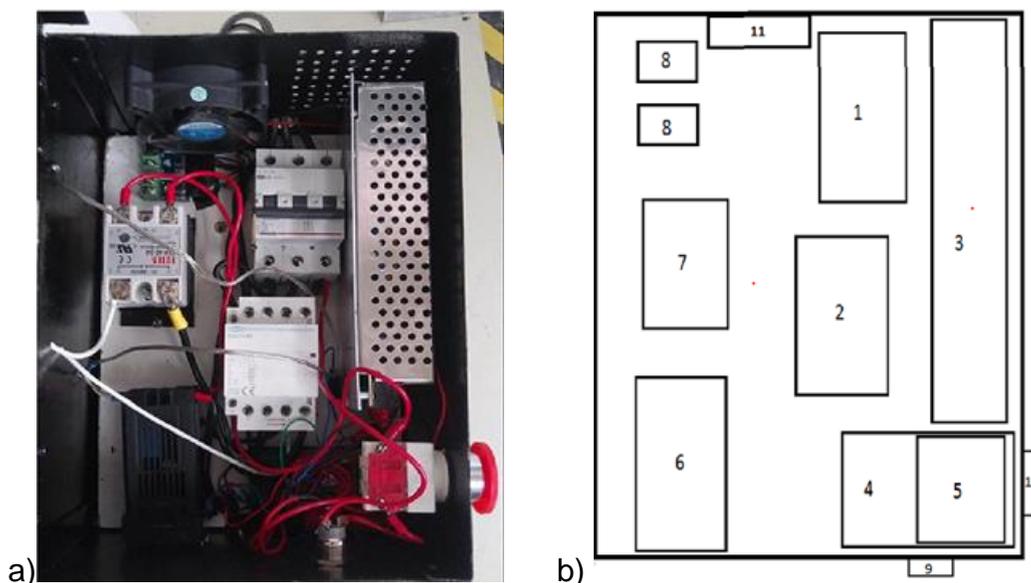


Figura 49. Conexión del sistema eléctrico: a) Conexiones entre los componentes y b) distribución de los componentes.

La alimentación trifásica se obtuvo mediante una clavija 30 A 250V NEMA® L 15-30, la cual fue conectada al interruptor termomagnético y al contactor como se muestra en la Figura 48 utilizando cable Vinanel XXI 600V calibre 8, donde el interruptor termomagnético y el contactor fueron montados sobre un riel DIN previamente atornillado sobre la base. Además, el SSR fue montado sobre un disipador de calor de aluminio atornillado a la base para evitar el sobrecalentamiento del relevador.

Las conexiones entre el interruptor termomagnético, contactor, SSR, alimentación del controlador y alimentación de la fuente de 12 V, se realizaron con cable Vinanel XXI 600V calibre 10. Las conexiones entre los demás componentes fueron realizadas con cables calibre 18 y calibre 22 aislados con thermofit.

Por otra parte, la alimentación de la resistencia eléctrica se realizó mediante cable con aislamiento mineral para altas temperaturas calibre 16. A su vez, la unión eléctrica entre el cable y la resistencia se desarrolló mediante un bloque cerámico con terminales de latón, permitiendo el fácil montaje de dichos componentes.

Basándose en las conexiones mostradas en las Figuras 42, 44, 45, 46 y 48, se realizaron las conexiones eléctricas de cada uno de los componentes eléctricos y electrónicos de los sistemas de calentamiento, enfriamiento y movimiento. Sin embargo, debido a las pruebas y distancias entre los componentes se reemplazaron las conexiones de los circuitos de las Figuras 44, 45 y 46 por los mostrados en las Figuras 50, 51 y 52 respectivamente.

En la Figura 50 se puede observar el uso de dos módulos MAX 6675, lo cual permitiría el uso de dos termopares dentro de la muestra para monitorear la temperatura en distintos puntos de la misma. Por su parte, en la Figura 51 se muestra la conexión realizada para el uso de la bomba de agua, en la cual se hace uso del módulo Monster Moto Shield. En la Figura 52 se muestran las conexiones utilizadas para el uso del motor, observando que se omite el uso del módulo Monster Moto Shield, como se ha planteado en la Figura 46, ello debido a que el motor JGY-2430 tiene su etapa de potencia integrada.

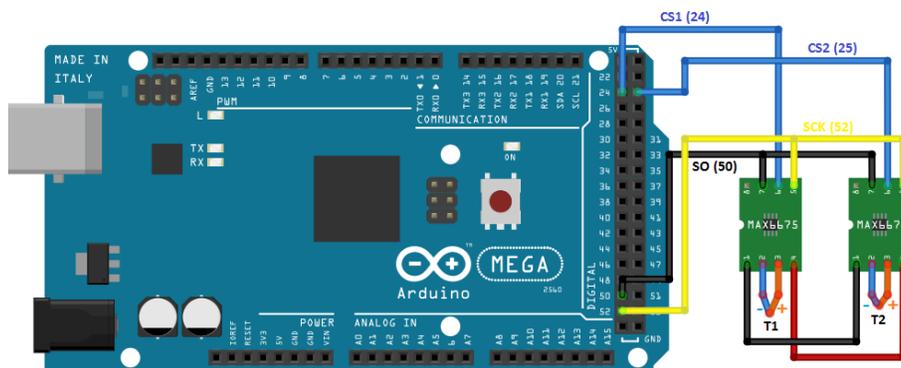


Figura 50. Conexión final entre Arduino® Mega y dos módulos MAX 6675.

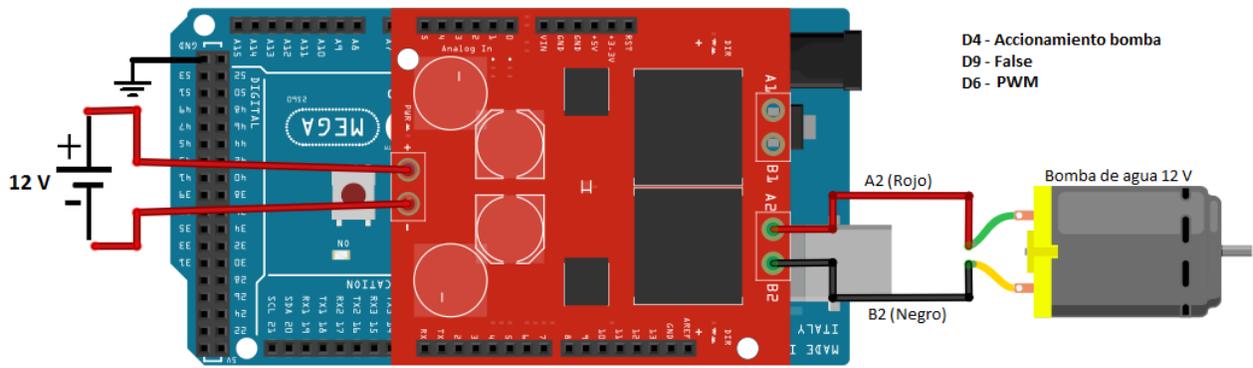


Figura 51. Conexión final entre Arduino® Mega y la bomba de agua Yosoo.

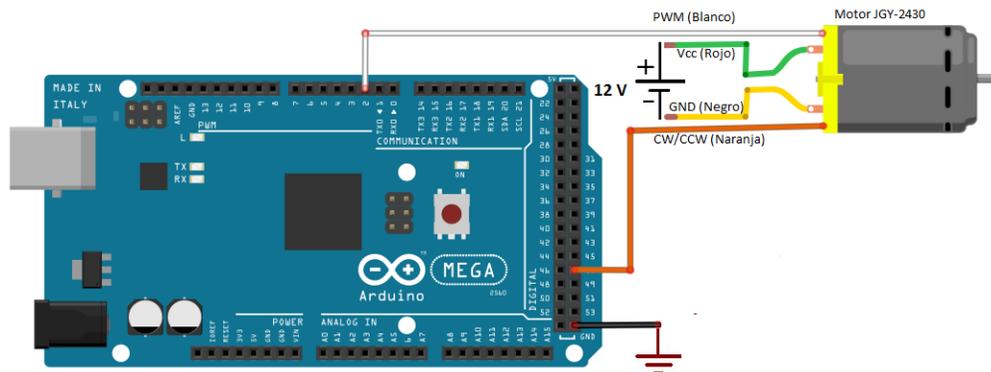


Figura 52. Conexión final entre Arduino® Mega y el motor JGY-2430.

Por otra parte, el esquema de conexión de la fuente de alimentación conmutada de 12 V y los demás dispositivos se muestra en la Figura 53. En primer lugar, la fuente fue conectada a 120 V CA mediante el contactor, como se muestra en la Figura 48, utilizando una línea y el neutro. De igual forma la tierra (GND) del Arduino® Mega fue conectada a la fuente con el fin de tener la misma referencia para todos los dispositivos.

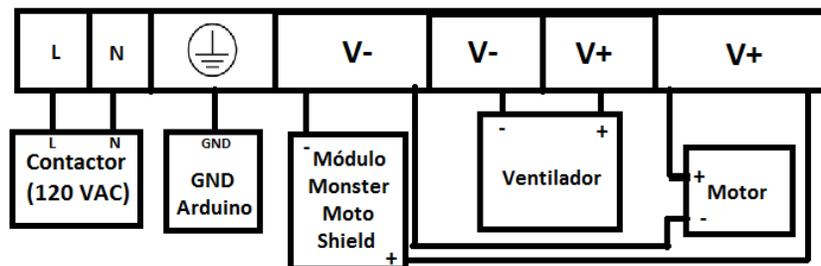


Figura 53. Esquema de conexión de la fuente de alimentación conmutada.

Al mismo tiempo fue utilizada una salida de voltaje de 12 V de la fuente para la alimentación del motor JGY-2430 y del módulo Monster Moto Shield. A su vez se utilizó la segunda salida de voltaje de la fuente para la alimentación de un ventilador de 12 V. El ventilador fue utilizado con el propósito de evitar el sobrecalentamiento sobre los

componentes de la caja de control debido a su funcionamiento y por su proximidad al sistema de calentamiento.

A partir de las dimensiones de cada uno de los componentes del sistema eléctrico se cortó una base de madera de 20 cm x 28 cm para usarla como plataforma dentro de la caja de control; se realizaron barrenados sobre la misma para fijar las posiciones de los componentes con tornillos.

A continuación, para la fabricación de la caja de control, se cortaron dos láminas de acero de 17 x 31 cm y dos de 17 x 23 cm haciendo uso de una cizalla. A continuación, mediante una dobladora de lámina se realizaron dobleces de 2 cm a 90° en cada lámina, con el fin de obtener una forma de caja. Además, se realizaron dos barrenados en cada doblez para posteriormente utilizar remaches para fijar las láminas. Posterior a ello se usaron sacabocados y un taladro para la elaboración de los espacios necesarios para el montaje de los botones, y orificios necesarios para la ventilación de la caja.

Posteriormente se cortó una lámina de 33 x 25 cm con dobleces de 2 cm para tapar la caja de control, y se colocaron dos bisagras entre la caja y la tapa. Por último se utilizó un Moto Tool y un disco de corte de metal para la elaboración de un corte de 5 cm x 5 cm en la pared frontal de la caja para el montaje del controlador de temperatura. En la Figura 54 se puede observar la caja de control realizada con los componentes montados. Pueden consultarse las medidas de la caja de control en el plano 22 en el Anexo 3.

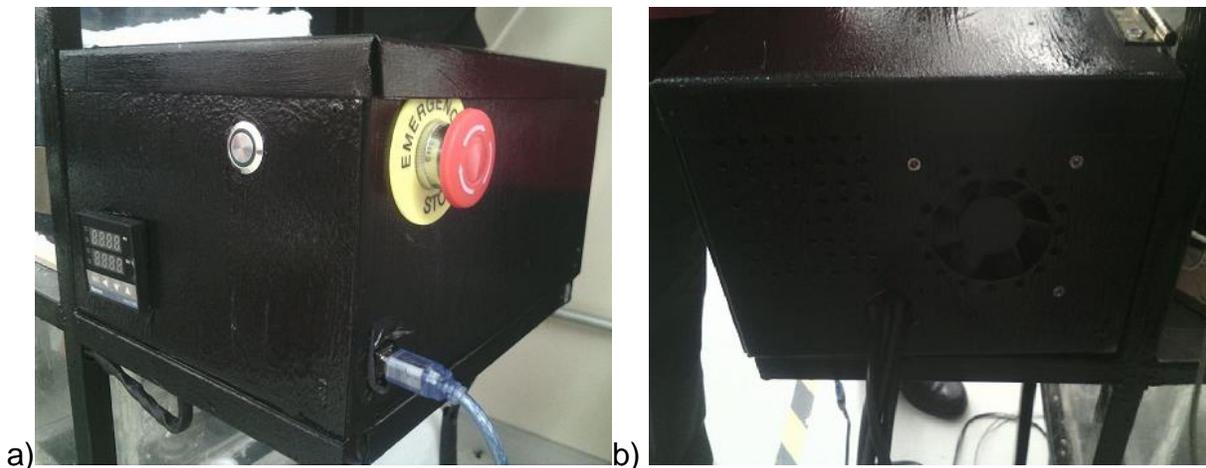


Figura 54. Caja de control: (a) vista isométrica y (b) vista inferior.

4.3. CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA

Para realizar el soporte de cada uno de los sistemas se construyó una estructura de tres niveles, en los cuales se tomaron en cuenta las dimensiones mostradas en el plano 21 del Anexo 3

Se realizaron cortes con una tronzadora a un perfil tubular cuadrado C075 para obtener las piezas necesarias para la construcción de la estructura, como se muestra en la Figura 55.



Figura 55. Corte de perfil tubular.

Se soldó a tope cada una de las piezas, como se muestra en la Figura 56 mediante el proceso SMAW y un electrodo E6013 de 3/32 in con una corriente de 50 A. Además se hizo uso de una prensa esquinadora y un nivel para alinear la estructura.



Figura 56. Realización del proceso de soldadura en el perfil tubular.

Posteriormente se soldaron tres piezas de perfil tubular cuadrado en el tercer nivel de la estructura, como se muestra en la Figura 57 para el posterior montaje de la caja de control. Además, se utilizó una esmeriladora angular con disco de desbaste para pulir la estructura.



Figura 57. Estructura soldada y pulida.

Por otra parte, se cortaron 4 pedazos de lámina de acero calibre 18 en la cizalla para colocarlas sobre cada uno de los niveles de la estructura. Posteriormente, se realizaron barrenados sobre cada una de las láminas para posteriormente fijarlas mediante remaches al perfil tubular. Además, se utilizó un sacabocados para metal con el fin de realizar los orificios necesarios en cada lámina para los orificios por los cuales pasará la barra guía y la muestra, así como para los orificios de entrada y salida del agua para el sistema de enfriamiento.

4.4. SISTEMA DE CALENTAMIENTO

En este apartado se especifica la construcción e implementación del sistema de calentamiento. Se abordan los cambios realizados al diseño planteado con anterioridad, y también los procedimientos necesarios para la construcción del sistema.

Antes de la fabricación del horno se optó por cambiar la configuración hexagonal de la pared de ladrillos refractarios propuesta anteriormente, sustituyéndola por una configuración octagonal. Dicha consideración fue tomada debido a que es más sencillo realizar cortes sobre ladrillo refractario de mayor grosor, con el fin de evitar que se fracture al momento de realizar el proceso.

A su vez, fueron utilizados cuatro ladrillos refractarios rectangulares de dimensiones 229 x 114 x 64 mm. A partir del corte de los ladrillos se obtuvieron 8 piezas, para lo cual, las nuevas dimensiones de la pared de ladrillos fueron modificadas a los valores mostrados en la Figura 58. Para más detalles de las dimensiones y acomodo de la estructura propuesta de ladrillo refractario pueden consultarse los planos 1 y 2 en el Anexo 3, correspondientes a los planos de diseño de esta estructura y del horno.

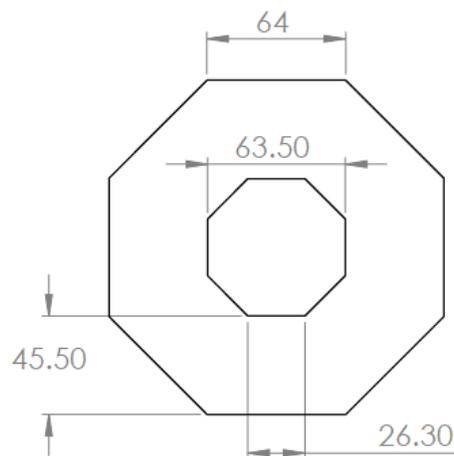


Figura 58. Configuración octagonal de la pared de ladrillos.

Para la realización de los cortes de ladrillo se utilizó una esmeriladora angular y un disco de diamante de 4.5 in (114.3 mm). Posteriormente se cortaron cada uno de los ladrillos en forma de prisma trapezoidal, como se muestra en la Figura 59.

Como fue planteado con anterioridad, se utilizó una resistencia de Kanthal A-1. La resistencia obtenida trabaja con un voltaje de 220 V, y a una potencia de 2000 W, con un diámetro de hilo de 0.95 mm, y se encuentra enrollada en forma de espiral con un diámetro de espira externo de 6.10 mm y una longitud de la resistencia de 600 mm comprimida, siendo alargada en este caso hasta 3.5 metros.

A partir de las dimensiones de la resistencia se realizaron ranurados en los ladrillos, como se muestra en la Figura 59. Para ello fue utilizado un goniómetro, con el cual se pudo obtener el ángulo necesario de las ranuras para que así tuvieran la inclinación adecuada para una vez ensamblados, formar un espiral y colocar la resistencia. De igual forma fueron utilizados la esmeriladora angular y el disco de diamante para la elaboración de los ranurados.



Figura 59. Ladrillos refractarios cortados y ranurados.

Para unir y fijar los ladrillos en configuración octagonal se utilizó mortero, como se muestra en la Figura 60. Posteriormente se utilizó alambre recocido para dar firmeza a la estructura del horno mientras secaba el mortero, dejándolo reposar por 24 horas.



Figura 60. Pared de ladrillos fijada con mortero y alambre recocido.

Como siguiente paso, se colocó la resistencia como se muestra en la Figura 61, haciendo además barrenos en los ladrillos para el paso del termopar utilizado para el control de la temperatura del horno, y otros 2 para los extremos de la resistencia de Kanthal.



Figura 61. Resistencia dentro de las ranuras del horno.

Posteriormente, se recubrió la estructura de ladrillos con fibra cerámica y una lámina de acero, las cuales se muestra en la Figura 62(a). Para ello, se utilizó una lámina calibre 18 cortada en una cizalla a 689.73 x 229 mm, la cual fue rolada para darle forma cilíndrica. Además, se cortaron dos láminas de 690 x 55 mm roladas de la misma forma, siendo utilizadas como abrazaderas del horno. Se colocó la fibra cerámica y la lámina alrededor de los ladrillos y se soldaron las abrazaderas mediante el proceso SMAW y electrodos E6013.

Por otra parte, se colocó un tubo de alúmina de 64.55 mm de diámetro exterior, 54.74 mm de diámetro interior y 230 mm de largo. Además, adentro del tubo de alúmina se colocó el susceptor de grafito, con diámetro exterior de 54.74 mm, diámetro interior de 6 mm y 230 mm de largo, como se muestra en la Figura 62(b). Después se atornilló un bloque cerámico sobre la lámina de acero, como se muestra en la Figura 63, con el fin de conectar la resistencia con los cables provenientes del SSR y del contactor. Los cables conectados al bloque cerámico tienen aislamiento mineral para altas temperaturas.

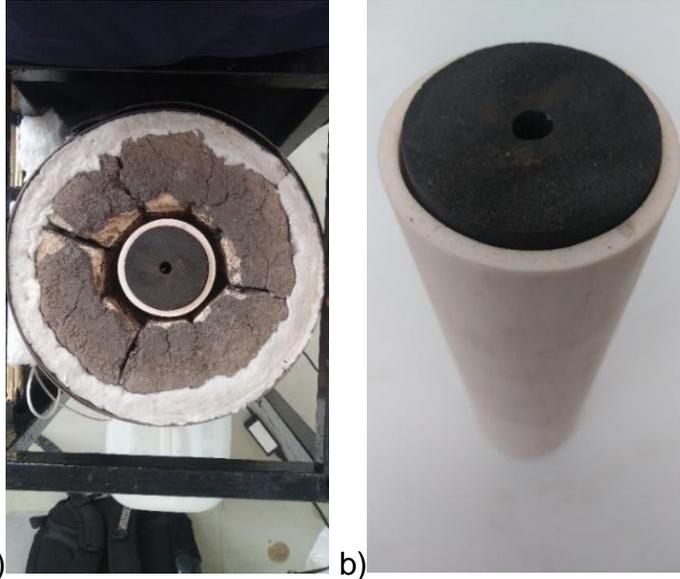


Figura 62. Paredes del sistema de calentamiento: a) Paredes internas y externas b) Paredes internas.



Figura 63. Bloque cerámico de la resistencia

4.5. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

En este apartado se especifica la construcción del sistema de enfriamiento, en el cual se aborda la construcción del contenedor de acrílico, así como su conexión a un bidón mediante tubería PVC, una válvula y una bomba de agua para permitir la recirculación del líquido.

A partir de las dimensiones propuestas de la cámara de enfriamiento, mostrados en los planos del 3 al 8 en el Anexo 3, se generó un archivo DXF de cada una de sus paredes. Posteriormente, se hizo uso de una máquina de corte láser para realizar las piezas en placas de acrílico de 6 mm de espesor. A continuación se ensambló cada una de las piezas y se fijaron con pegamento epóxico. Además, se utilizaron dos conexiones hembra de CPVC para rosca de 0.5 in (12.7 mm) fijados a los orificios de la pared inferior de acrílico mediante pegamento epóxico, como se muestra en la Figura 64, con el fin de poder enroscar dos adaptadores macho para conectar mangueras de 0.5 in (12.7 mm).

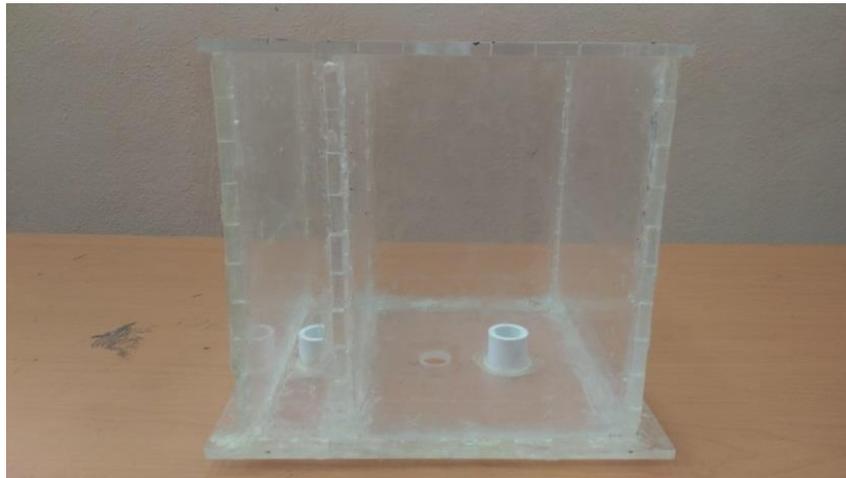


Figura 64. Ensamble de las paredes de acrílico.

Con el fin de poder desplazar el mecanismo de movimiento del crisol a través del sistema de enfriamiento se diseñó en CAD el diseño mecánico, el cual, por simplicidad en el proceso debido a la falta de herramienta y complejidad de la pieza, fue fabricado en una impresora 3D con filamento de PLA. Una vez impresa la pieza se barnizó y fueron colocados O-rings, tal como se observa en la Figura 65.



Figura 65. Sello mecánico impreso en PLA.

Por otro lado, se utilizó un bidón con capacidad de 20 L, como se muestra en la Figura 66, el cual fue conectado a una bomba de agua Yosoo mediante tubería y una válvula de CPVC, siendo fijados con cemento azul. Además, la bomba de agua fue conectada a uno de los adaptadores macho en la pared inferior de la cámara de enfriamiento mediante manguera transparente de 0.5 in (12.7 mm) para permitir la entrada de agua. A su vez, fue empleada una segunda manguera conectada al otro adaptador macho, la cual permite el retorno de agua hacia el bidón.



Figura 66. Conexión entre el bidón y el recipiente de acrílico.

4.6. SISTEMA MECÁNICO

En esta sección se aborda la descripción de los procesos de maquinado para cada uno de los elementos necesarios y el ensamblado de los mismos para la conformación del sistema de transmisión mecánico, basándose en lo presentado en la sección 3.3 del documento, y refiriéndose a los planos del 10 al 20 del Anexo 3. Para esto, se utiliza el equipo de máquinas herramienta de la unidad como la fresadora vertical JVM-836-3 (JET®), torno horizontal Titanium® YZ-1440, el centro de maquinado HAAS® TL2, y el taladro fresador vertical JMD-18 (JET®).

4.6.1. Barra guía

En primera instancia se adquiere una barra de latón de 0.25 in (6.35 mm) de diámetro y una longitud de 500 mm. Posterior a ello se reduce la longitud con un corte de segueta a 395 mm, teniendo una holgura de 3 mm de la longitud deseada. Posteriormente la pieza es montada en el torno horizontal para el refrentado de la barra, así como para el cilindrado de la misma hasta un diámetro de 4 mm por un largo de 12 mm, sección en la cual se realiza la rosca externa de la pieza manualmente con una tarraja métrica de M4x0.7, como se describe en la Figura 67(a) y es realizado y mostrado en la Figura 67(b) como producto.



Figura 67. Barra guía: (a) Diagrama de medidas de la rosca externa, (b) producto final.

Finalmente la barra es montada sobre el taladro fresador, en el cual se realiza un barrenado sobre la cara cilíndrica por todo con una broca de 1/16 in (1.5875 mm), orificio por el cual pasará la cuerda que se conectará a su vez a la polea roscada dentro del sistema de transmisión mecánico para el desplazamiento de la misma.

4.6.2. Polea roscada

Para la realización de esta pieza se toma como materia prima una barra de aluminio 6061 con un diámetro inicial de 1 in (25.4 mm) y de 100 mm de largo, la cual es una holgura suficiente para la sujeción de la pieza en el torno horizontal (consúltese el plano 11 en el

Anexo 3). Posteriormente, esta pieza es montada en el torno para su refrentado y cilindrado como una barra redonda escalonada con diámetros exteriores de 13.62 mm y 23.62 mm. Una vez realizado esto, se ajusta el acoplamiento de engranes dentro del torno para el avance de rosca, el cual es configurado a 14 hilos por pulgada. Por último, se realiza el roscado sobre ambos niveles con el fin de obtener diámetros menores de 10 mm y 20 mm como lo planteado en el diseño.

A continuación, se monta la pieza en el taladro fresador para el barrenado de 2 orificios de 1/16 in (1.5875 mm) para el paso y amarre de la cuerda conectada a la barra guía, así como el orificio de 11/64 in (4.365 mm) por todo, en el cual, manualmente se realiza la rosca interna con un machuelo métrico M5x0.8, obteniendo finalmente la pieza mostrada en la Figura 68.



Figura 68. Polea roscada.

4.6.3. Ejes de transmisión

En este caso, para la construcción del primer eje de transmisión se realiza el maquinado en el torno horizontal de una barra de acero AISI 1018 de 0.25 in (6.35 mm) mediante un refrentado y cilindrado para la obtención de una sección de la barra de 5 mm de diámetro en una longitud de 64.6 mm. Posteriormente se realizan 3 muescas con una profundidad de 0.5 mm para el acoplamiento de 2 anillos de retención para bloquear el movimiento del eje entre los rodamientos y 1 para el del engrane como se muestra en el plano 12 del Anexo 3. Finalmente, se corta la barra a la longitud deseada con una segueta.

A continuación, se monta la barra en el taladro fresador para realizar el orificio de 2 mm a través de la cara cilíndrica, para ahí colocar el seguro que bloqueará el movimiento giratorio del engrane respecto al eje.

Posteriormente se realizó el ensamble y sujeción de los elementos del primer eje de transmisión, como en el plano 14 del Anexo 3, tal como se muestra en la Figura 69.

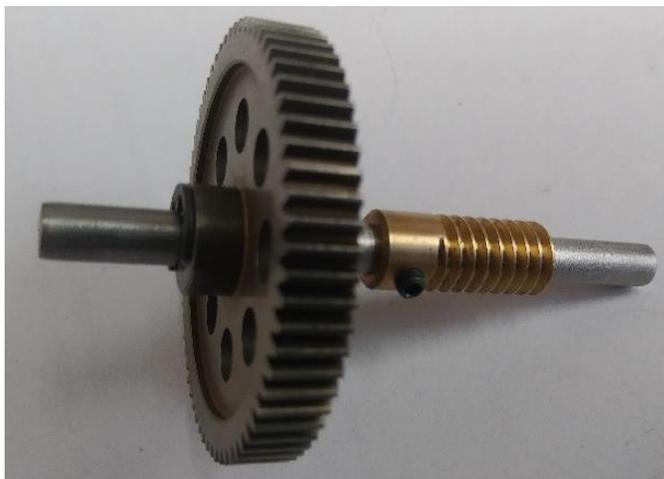


Figura 69. Ensamble de elementos del primer eje de transmisión.

A continuación, como en el caso anterior, se realiza el maquinado en el torno horizontal del segundo eje de transmisión con la misma barra de acero AISI 1018 para la obtención de un diámetro de 6 mm en una longitud de 110 mm. Además, se realizó el cilindrado a 5 mm en los extremos de este tramo para el ajuste de la barra dentro de los rodamientos.

Finalmente se llevó a cabo el proceso del barrenado por la cara cilíndrica de la barra en el taladro fresador vertical para los orificios de 1/16 in (1.5875 mm), mismos que se encontrarán alineados con los de la polea roscada, para pasar la cuerda a través de ambos elementos (consúltese para más detalles los planos 13 y 15 en Anexo 3). Se muestra en la Figura 70 el ensamblaje y sujeción de los elementos del segundo eje de transmisión.



Figura 70. Ensamblaje de elementos del segundo eje de transmisión.

4.6.4. Paredes laterales de la caja de transmisión

En primer lugar se realiza el corte con segueta de las 4 paredes laterales del sistema mecánico con una holgura de 2 mm a 3 mm de las dimensiones planteadas para las mismas (véanse los planos 16, 17, 18 y 19 en el Anexo 3).

A continuación, se montan cada una de las paredes en la fresadora vertical, en la cual se realiza el escuadrado de las mismas mediante fresado cilíndrico y frontal en las caras laterales con cortadores de 3/4 in (19.05 mm), para después realizar el rectificado de la cara frontal y posterior mediante el uso de una fresa de superficie (o face mil, en inglés). Véase el realizado de las operaciones respectivamente en la Figura 71(a) y la Figura 71(b).

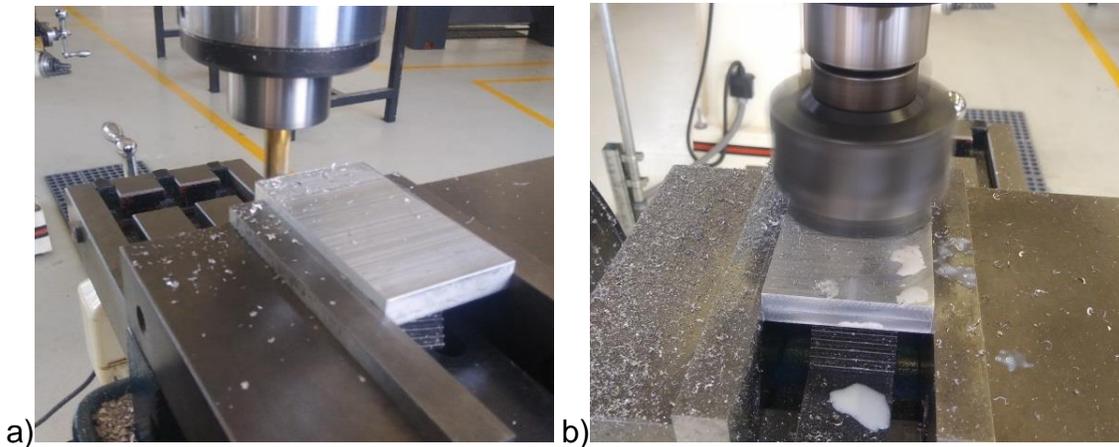


Figura 71. Fresado de paredes laterales: (a) fresado cilíndrico (b) fresado frontal de superficie.

Una vez teniendo las dimensiones deseadas de las placas se realizan los orificios de 11/64 in (4.365 mm) en las caras laterales para el atornillado y sujeción de las mismas, orificios que posteriormente son roscados de forma manual con un machuelo M5x0.8.

A continuación, se plantea el uso del centro de maquinado para la realización de los barrenos pasados y las cajas para los rodamientos en las caras frontales, pues, como se observa en la sección 3.3 del diseño del sistema de movimiento, así como en los planos de estas caras, se requiere de alta precisión para el acomodo de los ejes y componentes, en caso contrario, es posible que existan interferencias en el acomodo de los engranes y el mecanismo sinfín-piñón, o bien, que no tengan ningún tipo de contacto al ensamblar.

Para esto, se realiza el código G para cada una de las caras, contenidos en el Anexo 2 del documento, mismos que fueron probados a través del software CIMCO Edit V7, así como en el panel del centro de maquinado, y dentro de la máquina operando en vacío. En la Figura 72 se muestran las paredes laterales del sistema de transmisión mecánica.



Figura 72. Paredes laterales del sistema de transmisión mecánica.

4.6.5. Ensamble de caja de transmisión mecánica

Una vez realizado el maquinado de cada uno de los elementos desarrollados anteriormente, se montan los rodamientos sobre las paredes laterales del sistema de transmisión mecánica, el motor, y los ejes de transmisión construidos y ensamblados en las secciones previas. En la Figura 73 el ensamble en su totalidad, incluyendo las escuadras de unión de 1.5 in (38.1 mm) atornilladas.

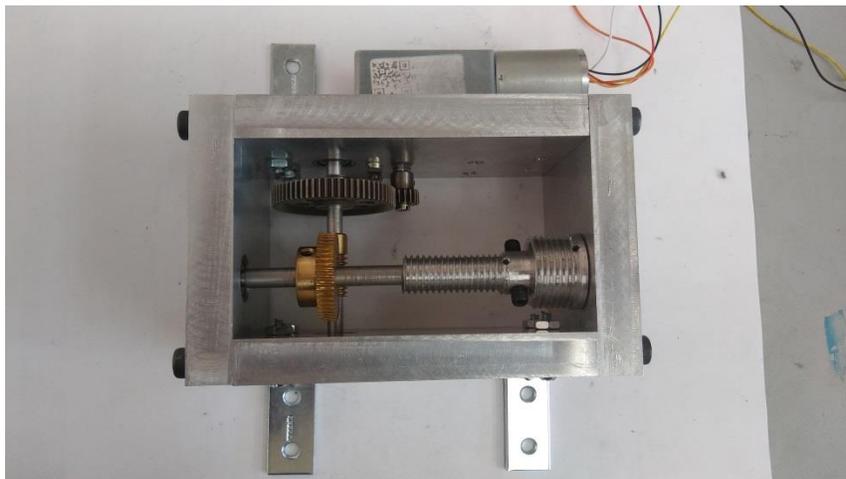


Figura 73. Ensamble de sistema de transmisión mecánica.

4.7. ACOPLAMIENTO DE SISTEMAS

Después de la construcción de cada uno de los sistemas, se utilizaron remaches sobre la estructura para fijar la caja de control previamente construida, con lo que a continuación se introdujeron y se conectaron los componentes de la misma.

A partir de esto, se cortaron los cables a la medida necesaria para la realización de las conexiones eléctricas. Así mismo, para evitar el desgaste de los cables para el control de la bomba y el motor de CD, se introdujeron los cables a través de un perfil tubular de la estructura, protegiéndolos con thermofit.

Posteriormente se realizó el montaje de cada uno de los sistemas y componentes secundarios en la estructura como se muestra en la Figura 74, con lo que se parte para la realización de pruebas.



Figura 74. Acoplamiento final de todos los componentes de la estructura.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

5.1. PRUEBAS PRELIMINARES Y AJUSTE DEL SISTEMA

Se utilizó la interfaz gráfica, descrita en la sección 3.5, para la realización de las pruebas individuales y en conjunto de los sistemas para la manipulación y el monitoreo de los parámetros del sistema Bridgman, con el fin de obtener los parámetros necesarios para caracterizar los actuadores.

5.1.1. Prueba del sistema de calentamiento

Antes de realizar pruebas haciendo uso de la resistencia de Kanthal contenida dentro del horno, se hicieron mediante el uso del controlador de temperatura REX C-100, un termopar tipo K, un relevador de estado sólido y un foco incandescente de 40 W, con el fin de verificar que el funcionamiento del controlador fuera correcto, como se muestra en la Figura 75.

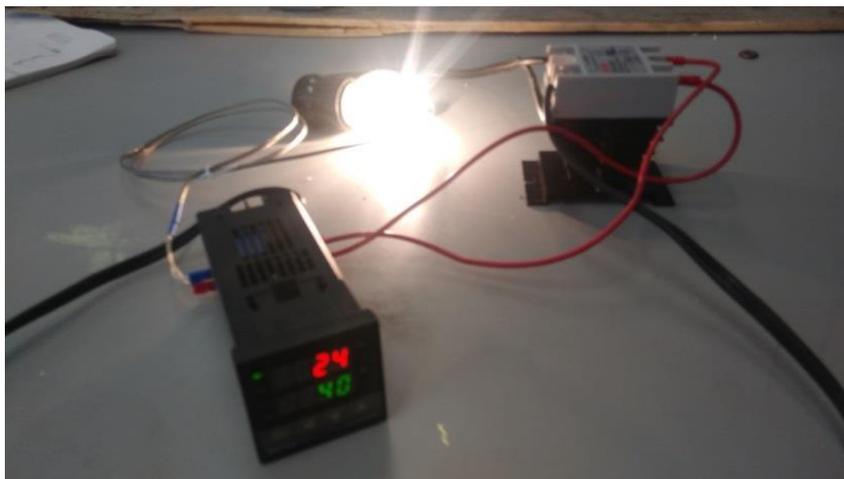


Figura 75. Prueba de funcionamiento del controlador.

Así mismo, se realizaron pruebas en agua hirviendo con el termopar y el controlador, comparando la temperatura registrada con la de un termómetro, de esto no se obtuvieron diferencias significativas en las lecturas, teniendo un rango de error de ± 5 °C, con lo que resultó estar adecuadamente calibrado.

Al observar un buen funcionamiento del controlador se procedió a acoplar el sistema de control con el horno, iniciando con una temperatura de 50 °C hasta una temperatura de 800 °C con incrementos de 50 °C, como se muestra en la Figura 76, siendo la temperatura máxima necesaria para la aplicación del sistema planteado. Para el mejor ajuste de la temperatura por medio del controlador se realizaron cambios en las ganancias PID haciendo uso de las ganancias recomendadas en el manual de instrucciones de 30 en proporcional, 240 en integral, y 60 en derivativo, con lo que la variación de la temperatura resultaba ser menor a ± 3 °C.

Sin embargo, al alcanzar la máxima temperatura se consideró el acoplamiento de una losa cerámica de 8.7 mm de espesor en la parte inferior del horno con el objetivo de aislar su temperatura de la estructura. Así mismo, para disminuir el efecto del calentamiento del horno sobre la caja de control se colocó un trozo de fibra cerámica entre ambas partes.

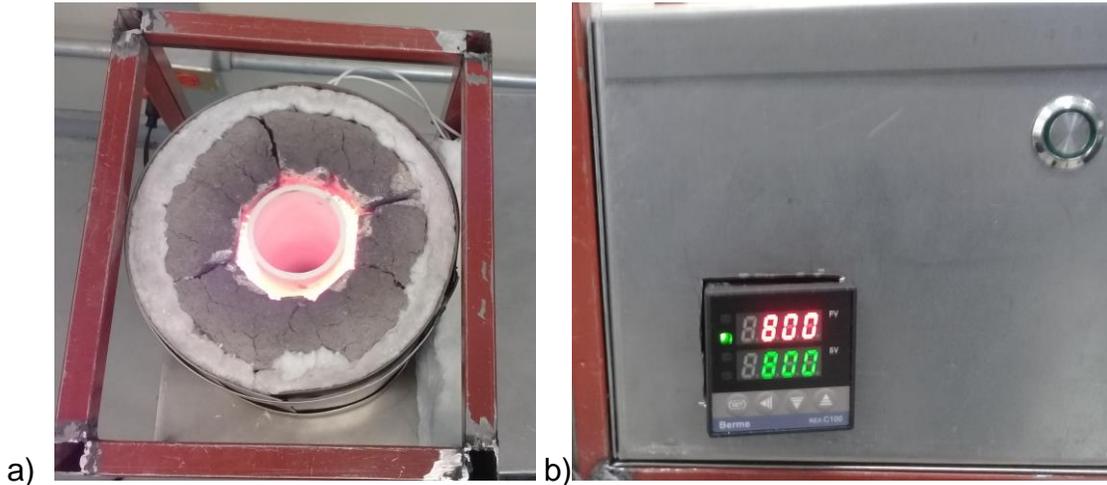


Figura 76. Prueba de calentamiento en el horno a 800 °C: (a) vista superior del horno en funcionamiento, (b) ajuste y estabilización de la temperatura programada en el controlador.

Por otra parte, haciendo uso del sistema de calentamiento se optó por la realización de mediciones con termopares con los que fuese leída la temperatura a través de los módulos MAX6675 y la interfaz gráfica, con los cuales la temperatura interna del horno difería en un rango de ± 7 °C, que para fines prácticos se considera un rango de error despreciable por el manejo de altas temperaturas.

5.1.2. Prueba de sistema de enfriamiento

En este caso, se utilizó la interfaz gráfica para la manipulación de los parámetros del sistema de enfriamiento, siendo en este caso únicamente el ajuste del ancho de pulso (mediante la técnica de PWM) que se suministra a la bomba de agua.

Para el ajuste del caudal por el usuario, es deseable el determinar una relación entre el ancho de pulso y el caudal de salida de la bomba dentro de su rango de operación. Para ello, en primer lugar se realizaron pruebas de llenado de la cámara de enfriamiento con el máximo ancho de pulso, para la cual se midió el tiempo de llenado, obteniendo así un caudal máximo de 6.2 L/min.

Posterior a ello se hace uso de un caudalímetro, con el cual se obtiene una frecuencia de pulsos dependiendo del caudal. En este caso, para el máximo ancho de pulso se

obtuvo una señal de 34 Hz, que es correspondiente a 6.2 L/min por lo que el factor de conversión de frecuencia a caudal es de 5.48.

Haciendo uso de un programa en Arduino® se realizó la obtención de datos del caudal para distintos anchos de pulso, con lo que se obtiene la curva de caracterización mostrada en la Figura 77, la cual es utilizada dentro del programa de la interfaz gráfica para que el usuario pueda ajustar el caudal requerido en un rango de 0.5 L/min a 5.8 L/min, que es el caudal máximo para la obtención de un flujo laminar (de acuerdo a la simulación de fluido abordada en la sección 3.2.3).

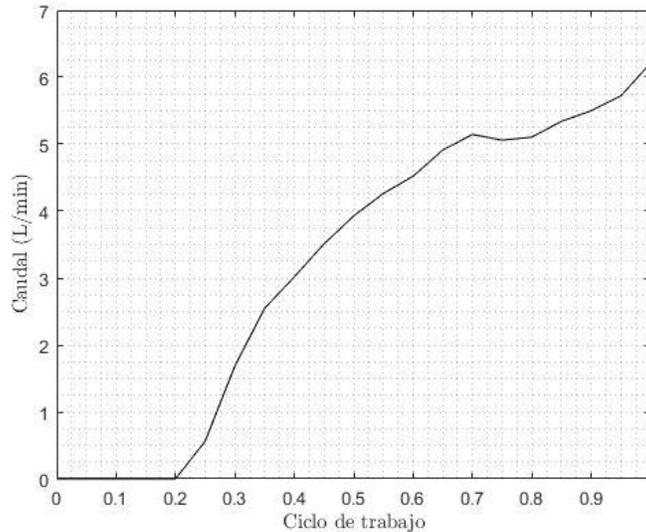


Figura 77. Curva de caracterización de la bomba de agua Yosoo.

5.1.3. Prueba del sistema mecánico

En este caso se utiliza un encoder con el cual, al igual que en el caso anterior, se mide el rango de velocidades del motor JGY-2430 realizando pruebas a diferentes porcentajes de ciclo de trabajo con el fin de obtener una curva de caracterización, como se muestra en la Figura 78.

Por otro lado, una vez implementado el sistema de movimiento se hicieron pruebas para verificar la velocidad lineal de la barra guía a través del horno y la cámara de enfriamiento, con lo que se obtuvieron los valores máximos para cada polea mostrados en la Tabla 12, a partir de los cuales, con el uso de la curva de caracterización, se obtienen los valores mínimos de velocidad. Esta relación es programada para el manejo del rango de velocidad lineal en la interfaz gráfica. De esto se comprueba que el mecanismo realizó un desplazamiento menor a los 10 $\mu\text{m/s}$ planteados anteriormente,

siendo de mayor utilidad para la realización de estudios a muy bajas velocidades. En la Tabla 12 se puede observar la velocidad mínima y máxima de las poleas utilizadas.

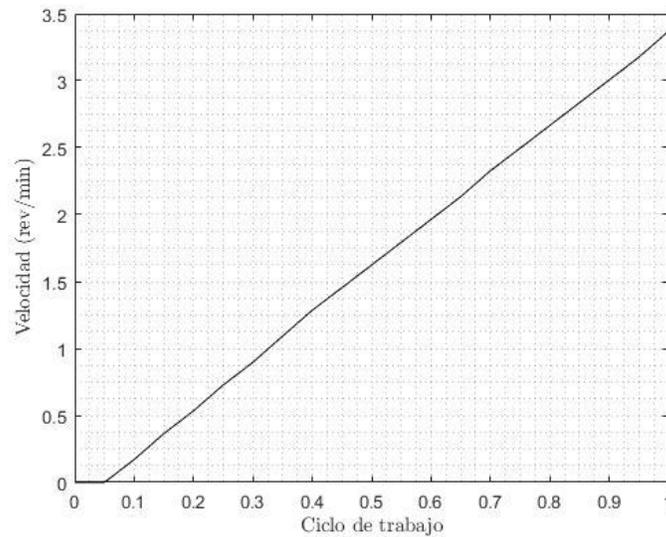


Figura 78. Curva de caracterización del motor JGY-2430.

Tabla 12. Rangos de velocidad lineal de la muestra.

Diámetro de la polea	Valor máximo (m/s)	Valor mínimo (m/s)
5 mm	4.96E-07	9.83E-06
10 mm	9.52E-07	1.89E-05

5.2. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

5.2.1. Metodología experimental

Con el fin de validar el funcionamiento del horno Bridgman se utilizó una aleación de Zinalco de composición química (en peso) de 22%Al-2%Cu-Zn (balance). La aleación maestra fue preparada en un horno de gas usando elementos de pureza comercial (99.5%). La aleación fundida fue colada en moldes metálicos de acero para obtener placas de 4cm de ancho, 15 cm de largo y 4 mm de espesor. Las placas obtenidas fueron cortadas para obtener muestras cilíndricas de 3 mm de diámetro y 120 mm de largo. Dichas dimensiones corresponden a las de la cavidad del crisol de grafito.

Para registrar la curva de solidificación de la aleación que se estudia, se fabricó un termopar tipo K con alambres de calibre 24. Los alambres delgados del termopar fueron recubiertos con un cerámico (nitruro de boro), el cual es un aislante térmico y eléctrico. Cuando el termopar quedó completamente aislado se procedió a introducirlo junto con la muestra al interior del crisol. Los polos del termopar fueron fijados en la tapa del crisol mediante cemento refractario con el fin de evitar movimientos indeseados durante el desplazamiento del crisol.

La temperatura de la prueba utilizada fue de 650 °C (150°C arriba del punto de fusión de la aleación). Antes de iniciar la prueba, la muestra se mantuvo a esta temperatura durante 30 minutos para asegurar una completa fusión de la carga. La velocidad lineal de desplazamiento del crisol se estableció en 19 $\mu\text{m/s}$. El caudal de agua usado fue de 0.56 L/min, asegurando un flujo laminar.

Cuando el procedimiento de solidificación concluyó se extrajo la muestra del crisol. Para poder preparar la muestra para su análisis, esta se encapsuló utilizando una mezcla de resina epóxica y catalizador. Posteriormente la muestra se preparó mediante técnicas de metalografía convencionales tales como desbaste, pulido y ataque químico.

El proceso de desbaste se llevó a cabo con papel abrasivo lija utilizando grados desde 80 a 2000. Posteriormente, las muestras se pulieron con un paño, jabón líquido y alúmina en polvo de 0.5 micras. Finalmente, para revelar la microestructura se realizó un ataque químico con un reactivo llamado nital al 3%.

El análisis micro estructural se efectuó en un microscopio óptico marca VE407.

5.2.2. Resultados

En la Figura 79(a), se presenta una micrografía óptica tomada a 100X de la microestructura del metal base, mientras que en la Figura 79(b) se presenta una micrografía al mismo aumento (100X) de la muestra solidificada direccionalmente a una velocidad lineal de desplazamiento de $18.9 \mu\text{m/s}$.

Como se puede observar claramente, la microestructura del metal base está constituida por granos dendríticos equiaxiales (del mismo tamaño), típicos del sistema de aleación que se estudia, solidificados en moldes metálicos. Esta morfología equiaxial es promovida por nucleación heterogénea debido centros de nucleación o impurezas presentes en los metales base.

Por otro lado, la micrografía de la aleación solidificada direccionalmente, la cual fue tomada al mismo aumento que la anterior, muestra diferencias notables en la morfología microestructural. En esta imagen se observan dendritas columnares de mayor tamaño.

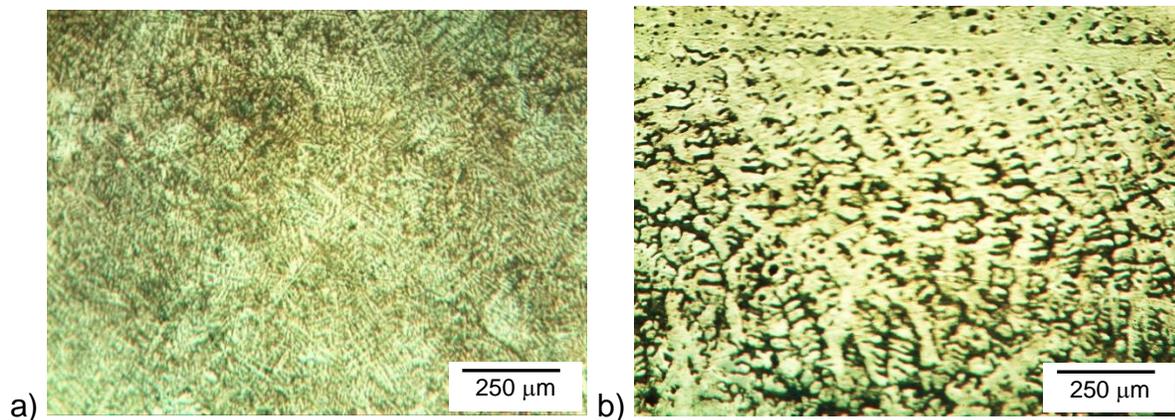


Figura 79. Microestructura de la muestra de Zinalco. Aumento de 100X: (a) Metal base y (b) Muestra solidificada direccionalmente.

En la Figura 80 se muestra la microestructura de la parte central de la muestra. En esta imagen se puede observar el efecto de la solidificación direccional al formar dendritas columnares de gran longitud. Es importante mencionar que la velocidad lineal de desplazamiento del crisol es igual a la velocidad de la interface sólido líquido, es decir la velocidad a la cual están creciendo las dendritas. La direccionalidad de las dendritas indica que la solidificación ocurrió desde la base del crisol hacia la parte superior. La flecha grande indica la dirección de solidificación, donde se observa el crecimiento de izquierda a derecha de la imagen.

Respecto al sistema de aleación solidificado (zinalco), el cual es base zinc, se puede deducir de la microestructura que la matriz dendrítica formada por brazos primarios

(indicados con la flecha 1), brazos secundarios (flecha 2) y brazos terciarios (flecha 3) está constituida por solución sólida rica en zinc, α -Zn, mientras que en los espacios interdendríticos se formó un eutéctico α +Al.

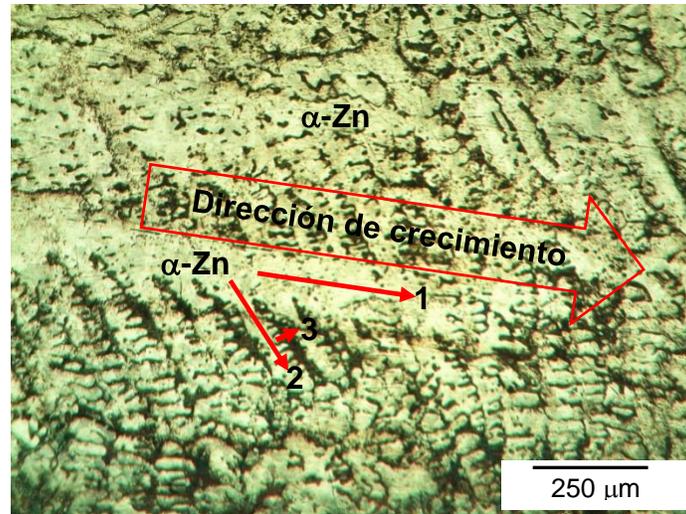


Figura 80. Microestructura de la muestra solidificada direccionalmente. Aumento de 100X.

5.2.3. Análisis térmico

Una función adicional implementada en el diseño del sistema Bridgman fue la de obtener gráficos de solidificación de temperatura vs tiempo. Estos gráficos son una herramienta muy importante que permite visualizar el crecimiento de las fases durante la solidificación y en algunos casos predecir la morfología de las fases. Además, con estos gráficos se puede determinar experimentalmente el gradiente de temperatura, el cual es una de las variables importantes de la solidificación.

A partir de la interfaz gráfica se utilizaron los datos almacenados por el programa sobre las mediciones periódicas del termopar cada segundo. A partir de ello se obtuvo la curva de enfriamiento de la aleación, mostrada en la Figura 81.

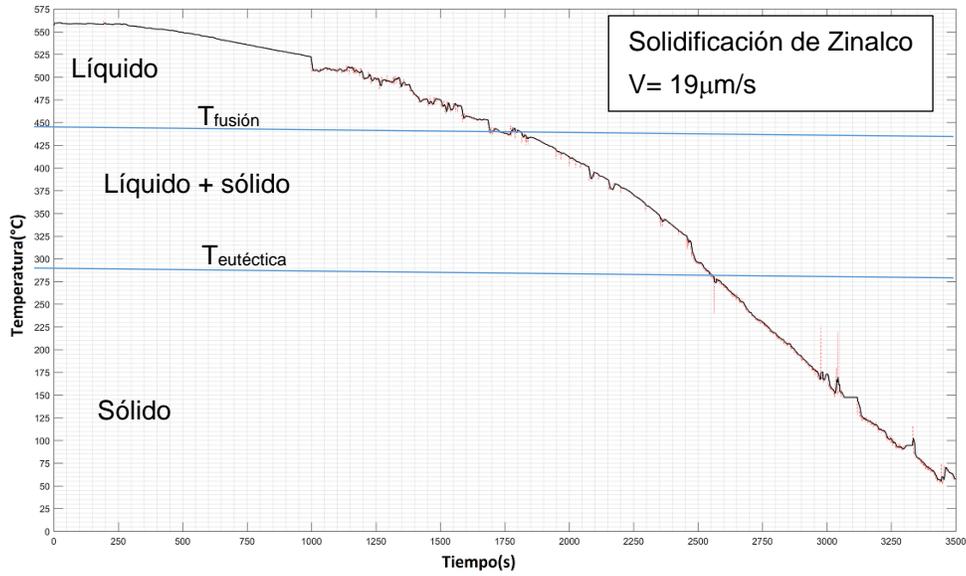


Figura 81. Curva de enfriamiento de la aleación zinalco solidificada en Bridgman

En esta curva de enfriamiento se pueden visualizar los cambios de fase, cuando la pendiente de la curva cambia. En la curva se alcanzan a visualizar cambios de fase a temperaturas aproximadas de 450°C y 285°C, las cuales son cercanas a las temperaturas teóricas de fusión y eutéctica, respectivamente, del zinalco.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

6.1. CONCLUSIONES

En primera instancia, se desarrolló este trabajo en base al objetivo general así como los específicos, teniendo finalmente un resultado satisfactorio en cuanto al cumplimiento de los mismos, en base a las pruebas realizadas de los sistemas de forma individual así como las pruebas en conjunto para la solidificación de muestras.

Como se mencionó anteriormente, dentro de las pruebas de los sistemas realizadas individualmente, el sistema de calentamiento fue capaz de alcanzar los 800 °C sin problemas, así mismo, se comprobó mediante el uso de termopares en la parte interna de las muestras que en esa zona se alcanza la temperatura marcada en el controlador con diferencias de ± 7 °C.

Por su parte fue adecuadamente controlada la temperatura mediante el dispositivo de control PID de temperatura mediante el sistema eléctrico, ajustando la temperatura con errores máximos durante la operación de ± 3 °C.

Así mismo, la programación para la manipulación de los parámetros tales como el caudal en el sistema de enfriamiento y la velocidad de desplazamiento lineal del sistema mecánico, fue implementado y desarrollado de manera adecuada a lo largo de los procesos de solidificación direccional documentados, así como la lectura de los 2 circuitos MAX6675 que digitalizan y compensan la señal de los termopares que se ubican al interior de la muestra, con los cuales se obtuvieron y almacenaron datos como los mostrados en el gráfico de la Figura 81 correspondiente a la curva de enfriamiento en la sección 5.2.3.

Por otro lado, se comprobó el flujo laminar en el sistema de enfriamiento de acuerdo con lo calculado y simulado en las etapas de diseño, en los cuales se describe que el flujo laminar se obtiene dentro del sistema siempre que el caudal sea menor o igual a 5.8 L/min. Una vez caracterizado el sistema con un caudalímetro, se ajustó un rango de caudales programado de 0.56 L/min a 5.8 L/min.

Del sistema mecánico, se caracterizó el rango de velocidades del motor, así como su comprobación a través de mediciones, en donde la velocidad de desplazamiento mínima resulta ser de 496 nm/s y la máxima de 18.9 $\mu\text{m/s}$, teniendo una velocidad mínima considerablemente más pequeña que la velocidad propuesta de 10 $\mu\text{m/s}$ (que se encuentra dentro del rango), lo cual resulta ser favorable para el sistema por el hecho de poder realizar estudios más amplios de varias muestras a velocidades de solidificación más bajas.

Sin embargo se considera, de forma independiente, que la validación del proyecto se basa en la funcionalidad del mismo al momento de realizar pruebas con materiales. Como fue descrito en la sección 5.2.2, las muestras solidificadas presentan diferencias notables a las del metal base, mostrando la tendencia del crecimiento de dendritas en la dirección de solidificación que suscita la operación del sistema.

Por otro lado, a lo largo del desarrollo del proyecto, se presentaron cambios en cuanto al diseño, debido a que durante el desarrollo del mismo se apreciaban cambios con el fin de resolver problemas que inicialmente no eran considerados, como pudo observarse a lo largo del documento, lo que implicaba regresar a las etapas de diseño para el ajuste y validación de los sistemas correspondientes, como lo fue en el caso del sistema de calentamiento por el hecho del cambio de la estructura de ladrillos de forma hexagonal a octagonal, o en el sistema de enfriamiento, por la impresión en 3D de PLA del sello mecánico, pieza que no fue posible de maquinar dentro las instalaciones ni fuera de ellas debido a falta de disponibilidad de herramientas como barra de interiores así como de la precisión de la máquina de torno.

Así mismo, como se ha descrito en el documento, el sistema de calentamiento funciona de manera independiente al sistema de movimiento y al de enfriamiento, por lo que puede ser de utilidad para la fundición de muestras sin necesidad de tener el proceso completo de solidificación unidireccional.

Finalmente, se espera que este proyecto sea de utilidad para la planta docente de la UPIIZ en la realización de investigaciones a lo largo del tema, así como el uso por parte de los estudiantes para el desarrollo de prácticas en las carreras de ingeniería metalúrgica e ingeniería mecatrónica.

6.2. TRABAJO A FUTURO

Este trabajo funciona adecuadamente para el fin y objetivos planteados, sin embargo, existe aún la implementación de mejoras en el sistema, las cuales no fueron finalmente abordados principalmente por falta de tiempo.

En primera instancia, se propone como trabajo a futuro el desarrollo de investigaciones y de realización de pruebas con crisoles de otros materiales que soporten las condiciones del sistema, debido a que los crisoles de grafito son frágiles, y son propensos a fracturarse o romperse por completo. Así mismo, es posible reducir las dimensiones de los mismos, con el fin de que el proceso pueda ser más rápido, así como la reducción del volumen de las muestras a dimensiones suficientes para su posterior manipulación al momento de realizar pulido de muestra y su análisis metalográfico.

Por otra parte, se propone el desarrollar un sistema embebido con cualquier otro circuito de control para el uso del sistema, con el fin de omitir el uso de la computadora durante las horas del proceso de solidificación, las cuales pueden ser de hasta días, debido a las velocidades manejadas por el sistema de hasta 496 nm/s.

Así mismo, se detecta que puede realizarse la implementación de otro motor de DC en el sistema de movimiento con otras velocidades nominales, con el fin de tener rangos distintos en las velocidades de desplazamiento de las muestras, lo que puede ampliar los resultados e investigaciones al respecto.

Además, el sistema tiene la capacidad de desmontar con facilidad el sistema mecánico, por lo que es posible implementar el diseño de un nuevo sistema para el desplazamiento lineal de la muestra, incluso con distintos tipos de actuadores, como hidráulicos o motores de corriente alterna.

Finalmente, se considera que podría realizarse el acoplamiento de un sensor de desplazamiento lineal de alta precisión, con el fin de comprobar constantemente la velocidad de la muestra y pueda ser utilizado para un sistema de control.

FUENTES DE CONSULTA

- [1] W. D. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Utah, Estados Unidos: Reverté, 2000.
- [2] M. Suárez “Predicción de las microestructuras de solidificación y distribución de soluto en aleaciones ternarias. Teoría contra experimento” Tesis Doctoral en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2009.
- [3] Carbolite (2017, junio, 25). *Vacuum, Inert and Reactive Gas Furnaces up to 3000 °C* [En línea]. Disponible en <http://online.fliphtml5.com/uebb/elvs/>
- [4] T. Suthan “Growth and characterization of organic single crystals by modified vertical Bridgman technique” Tesis de Doctorado en Física, Universidad Anna, Chennai, India, 2010.
- [5] W. F. Smith, J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. D.F., México: Alfaomega, 2006.
- [6] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*. D.F., México: McGraw-Hill, 2007.
- [7] J. M. Albella, *Introducción a la ciencia de materiales: Técnicas de preparación y caracterización*. Madrid, España: Textos Universitarios, 1993.
- [8] S. R. C. Ponce “Desarrollo de un modelo matemático para el método de crecimiento de cristales de Bridgman-Stockbarger” Tesis de Maestría en Ciencias (Física), Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, Febrero de 1994.
- [9] L. Yang, S. Li, X. Chang, H. Zhong, H. Fu, Twinned dendrite growth during Bridgman solidification, *Acta Materialia* 97 (2015) 269–281.
- [10] R. P. Mooney, S. McFadden, Z. Gabalcová, J. Lapin, An experimental-numerical method for estimating heat transfer in a Bridgman furnace, *Appl. Therm. Eng.* 67 (2014) 61-71.
- [11] J. P. Garandet, T. Alboussière, *Bridgman growth: modeling and experiments*, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* (1999) 73-132.
- [12] U. Böyük, H. Kaya, E. Cadirli, N. Marasli, A. Ülgen, Investigation of the effect of solidification processing parameters on microhardness and determination of thermo-physical properties in the Zn-Cu peritectic alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 491 (2010) 143-148.
- [13] J. Peterson, J. Derby, An axial temperature profile curvature criterion for the engineering of convex crystal growth interfaces in Bridgman systems, *Journal of Crystal Growth* 468(2017) 899-904.

- [14] E. Olson, "Low Cost Bridgman Type Single Crystal Growing Apparatus," Dept. Chemistry-General, Iowa State Univ., Iowa, Ames Laboratory Technical Rep. 28, 1960.
- [15] J. LeCroy, D. Popok, "Design of a High Thermal Gradient Bridgman Furnace," in Conf. 32nd Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Huntsville, Alabama, 1994.
- [16] E. Sunseri "Dendrite orientation in aluminum magnesium alloys" Thesis of Master of Science in Materials Science and Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa, 2009.
- [17] A. Lindsey, Y. Wu, M. Zhuravleva, M. Loyd, M. Koshan, C. Melcher, Multi-ampoule Bridgman growth of halide scintillator crystals using the self-seeding method, *Journal of Crystal Growth* 470 (2017) 20-26
- [18] E. Flores, R. Orellana, "Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas" Trabajo final de Ingeniería Mecánica, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador, 2014.
- [19] J. Méndez, W. Suasnavas, "Diseño y construcción de un horno eléctrico para el secado de los bobinados de motores de hasta 10 HP" Proyecto final de Tecnólogo en Electromecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2012.
- [20] Universidad de Oviedo (2017, septiembre,5). Pérdidas de calor [En línea]. Disponible en <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.HornosResistencia.PERDIDAS.CALOR.pdf>
- [21] CECYT7-IPN (2017, septiembre, 3). Ley de Joule [En línea]. Disponible en: <http://www.academico.cecyt7.ipn.mx/FisicaIII/temas/joule.htm>
- [22] KHANTAL (2017, julio, 17). Kanthal Super Electric Heating Element Handbook [En línea]. Disponible en <http://mtixtl.com/machineflyer/Handbook.pdf>
- [23] R. Gaviño, *Introducción a los sistemas de control*. México: Pearson, 2010.
- [24] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. Madrid, España: Pearson, 2010.
- [25] Y. Cengel, J. Cimbala, *Mecánica de fluidos Fundamentos y Aplicaciones*, D.F., México: McGraw-Hill, 2007.
- [26] Organización Panamericana de la Salud, "Guía para la selección de equipos de bombeo para sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento para el medio rural", Lima, Perú, 2007.
- [27] R. Budynas, J. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. D.F., McGraw-Hill, 2008.
- [28] J. Albarrán "Fundamentos del KBE (Knowledge Based Engineering): Aplicación al diseño de engranajes de ejes paralelos con CATIA v5", Escuela Superior de Ingenieros, Sevilla, 2008.

[29] MecanESO (2017, julio,17). Mecanismos para la transformación de movimientos [En línea]. Disponible en <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/>

[30] A. Acevedo, Metodología para la construcción de un horno de inducción electromagnética, Trabajo de investigación de Maestría en Ingeniería Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2007.

[31] ATECOS (2017, agosto,20). Materiales aislantes térmicos [En línea]. Disponible en http://www.miliarium.com/ATECOS/HTML/Soluciones/Fichas/Materiales_aislantes_termicos.PDF

[32] Navarra. Bombas hidráulicas [En línea]. Disponible en <http://www.navarra.es/NR/rdonlyres/4F8A02B4-A60A-42EA-9017-7C19F8722FA2/305689/Bombas2.pdf>

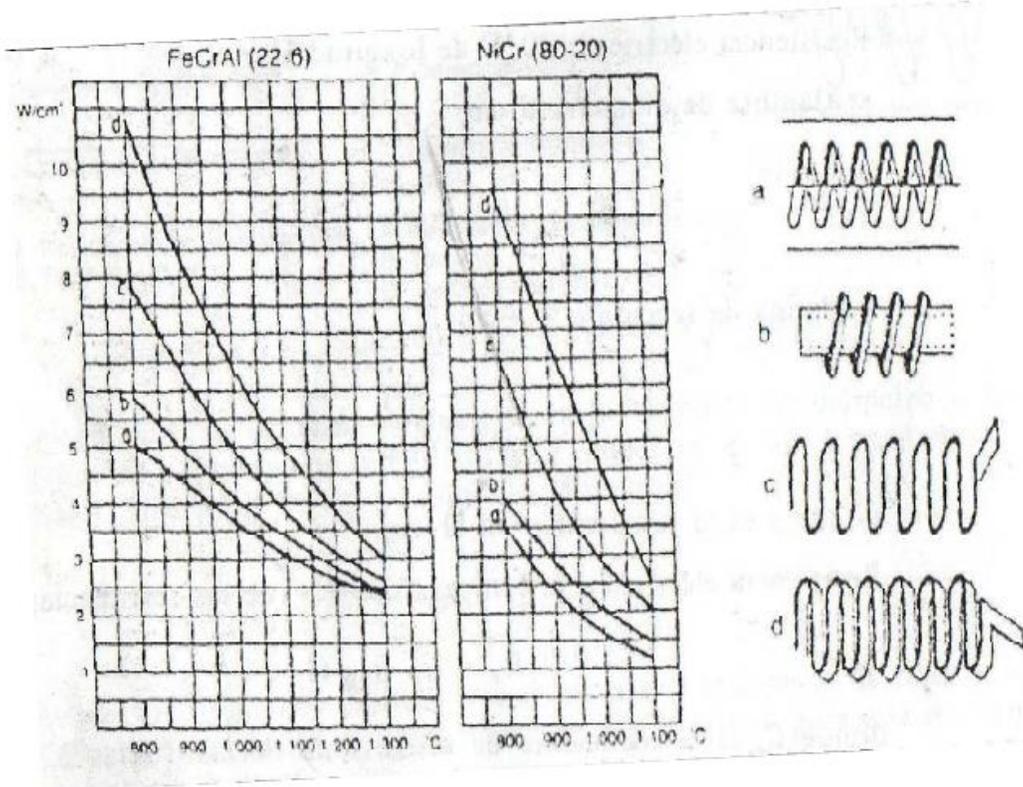
APÉNDICES

APÉNDICE 1. FACTOR DE RESISTIVIDAD DEL KANTHAL A-1

TEMPERATURE FACTOR OF RESISTIVITY

Temperature°C	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Ct	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05

APÉNDICE 2. CARGA ESPECÍFICA MÁXIMA DE RESISTENCIAS



APÉNDICE 3. CALIBRES DE ALAMBRE ESTADOUNIDENSE (AWG)

Tamaño o designación		Temperatura nominal del conductor [Véase la tabla 310-104(a)]					
		60 °C		75 °C		90 °C	
mm ²	AWG o kcmil	TIPOS TW, UF	TIPOS RHW, THHW, THHW-LS, THW, THW-LS, THWN, XHHW, USE, ZW	TIPOS TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THHW-LS, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	TIPOS UF	TIPOS RHW, XHHW, USE	TIPOS SA, SIS, RHH, RHW- 2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2
			COBRE				ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE
0.824	18**	—	—	14	—	—	—
1.31	16**	—	—	18	—	—	—
2.08	14**	15	20	25	—	—	—
3.31	12**	20	25	30	—	—	—
5.26	10**	30	35	40	—	—	—
8.37	8	40	50	55	—	—	—
13.3	6	55	65	75	40	50	55
21.2	4	70	85	95	55	65	75
26.7	3	85	100	115	65	75	85
33.6	2	95	115	130	75	90	100
42.4	1	110	130	145	85	100	115
53.49	1/0	125	150	170	100	120	135
67.43	2/0	145	175	195	115	135	150
85.01	3/0	165	200	225	130	155	175

APÉNDICE 4. TIPO DE TERMOPARES

Tipo de termopar	Composición química	Rango de aplicación (°C)	Notas
B	Platino 30% Rodio (+) Platino 6% Rodio (-)	1,370 a 1,700	Fácilmente contaminado, requiere protección.
C	Tungsteno 5% Renio (+) Tungsteno 26% Renio (-)	1,650 a 2,315	Sin resistencia a la oxidación. Vacío, hidrógeno ó atmósferas inertes.
E	Cromel (+) Constantán (-)	95 a 900	No someterlo a la corrosión en temperaturas criogénicas.
J	Hierro (+) Constantán (-)	95 a 760	Recomendado en atmósferas reductoras.
K	Cromel (+) Alumel (-)	95 a 1,260	Satisface en atmósferas oxidantes.
N	Nicrosil (+) Nisil (-)	650 a 1,260	Para uso general, mejor resistencia a la oxidación que el K
R	Platino 13% Rodio (+) Platino (-)	870 a 1,450	Recomendado en atmósferas oxidantes. Fácil de contaminarse.
T	Cobre (+) Constantán (-)	-200 a 350	El más estable en rangos de temperatura criogénica.

APÉNDICE 5. CALIBRES DE ALAMBRE DE TERMOPARES

Tipo de termopar	CALIBRES AWG = (mm)				
	8 = 3.25	14 = 1.63	20 = 0.81	24 = 0.51	28 = 0.33
T	***	370 °C	260 °C	200 °C	150 °C
J	760 °C	590 °C	480 °C	370 °C	320 °C
E	860 °C	650 °C	540 °C	430 °C	430 °C
K	1,260 °C	1,090 °C	980 °C	870 °C	760 °C
R	***	***	***	1,480 °C	***
S	***	***	***	1,480 °C	***
B	***	***	***	1,700 °C	***
N	1,260 °C	1,090 °C	980 °C	870 °C	760 °C

ANEXOS

ANEXO 1. RECOMENDACIONES DE USO

- Uso de equipo de seguridad como guantes de carnaza, lentes de seguridad y botas, al tratarse de un sistema que consume una alta potencia eléctrica y trabaja a altas temperaturas.
- Como se mencionó anteriormente, es conveniente retirar las muestras por la parte superior del sistema una vez que el horno haya alcanzado la temperatura ambiente, esto debido a que se hacen uso de crisoles de grafito, los cuales son muy frágiles, y de desplazarse por la parte inferior del sistema de enfriamiento, por el ajuste del sello mecánico, es posible que estos no pasen sin fracturarse o romperse por completo, habiendo, así mismo, riesgo de derramar el agua aún retenida dentro de la cámara de enfriamiento sobre el sistema mecánico.
- En el sistema mecánico, al momento de realizar una nueva muestra es necesario el desenrollar el cable de cobre que lo conecta con la barra guía, o bien cortarlo, para dejarlo listo para una nueva fundición. Por otra parte, esta misma cuerda puede tener desgaste con el uso, lo que puede implicar que el desplazamiento de la muestra no sea igual en todos sus puntos, y que la velocidad final de la muestra difiera con la programada.
- Las muestras dependen mucho del crisol a utilizar debido al volumen que pueden contener, en este caso se hacen uso de crisoles con la capacidad de introducir muestras cilíndricas de 3.16 mm de diámetro y 82.14 mm de largo (consúltese la Figura 16). Es recomendable el introducir muestras que se ajusten lo más posible a este diámetro y que sobrepasen el largo de 82.14 mm, esto, con el fin de poder extraer de forma manual y fácilmente las muestras al final del proceso. Así mismo, de ser posible, antes de introducir las muestras, recubrir el interior del crisol con nitruro de boro en polvo (de fórmula BN), el cual es un material ampliamente utilizado como liberador de moldes.
- En caso de realizar fundiciones que impliquen el uso de termopares al interior del crisol se debe de seguir la metodología mostrada en la sección 5.2 del documento. Así mismo se recomienda el uso de cables cromel y alumel para el sensado de la temperatura como un termopar tipo K, con calibres 20 o 24 (véase el Apéndice 5), principalmente por los rangos de temperatura que soportan, y los diámetros de los alambres, tales que puedan ser introducidos dentro del crisol junto a las muestras.

ANEXO 2. CÓDIGOS G

Pared lateral 1 del sistema de transmisión mecánica

%	T02 M06	M03 S1000
O00287	G43 H02	G90
G20 G17 G80 G40 G49	M03 S1000	G00 X1.8562 Y0.6299
G54 G90	G90	G00 Z1.0
G28 W0.0	G00 X0.3145 Y1.1713	G01 Z0.1 F5.
G28 U0.0	Z1.0	M08
G28 V0.0	G01 Z 0.1 F5.0	G83 G98 F5. Z-0.550
(T01: broca de centros)	M08	I0.140 J0.100 K0.050
T01 M06	G83 G98 F5. Z-0.550	R0.1
G43 H01	I0.140 J0.100 K0.050	(X1.8562 Y0.6299)
M03 S1000	R0.1	X0.9842 Y1.0236
G00 X0.3145 Y1.1713	(X0.3145 Y1.1713)	G00 Z1. M09
Z1.0	X0.3145 Y0.4807	G91 G28 G00 Z0. M05
G01 Z 0.1 F5.0	X3.6224 Y1.1713	(T04: cortador de 3/8)
M08	X3.6224 Y0.4807	T04 M06
G82 G98 F5. Z-0.200	X1.5019 Y0.9843	G43 H04
P1. R0.1	(X1.5019 Y0.2756)	M03 S1000
(X0.3145 Y1.1713)	X2.8404 Y0.9843	G90
X0.3145 Y0.4807	(X2.8404 Y0.2756)	G00 X0.9842 Y1.0236
X3.6224 Y1.1713	G00 X1.5019 Y0.2756	G00 Z1.0
X3.6224 Y0.4807	G00 Z1.0	G01 Z0.1 F5.
X1.5019 Y0.9843	G01 Z 0.1 F5.0	G01 Z0. F5.
X1.5019 Y0.2756	G83 G98 F5. Z-0.4	M08
X2.8404 Y0.9843	I0.140 J0.100 K0.050	G12 G91 I0. K0.0880
X2.8404 Y0.2756	R0.1	Q0.03 F10. Z-0.020 L12
X1.8562 Y0.6299	(X1.5019 Y0.2756)	D0
X0.9842 Y1.0236	X2.8404 Y0.2756	G00 G90 Z1. M09
G00 Z.5 M09	G00 Z1. M09	G91 G28 G00 Z0. M05
G91 G28 G00 Z0. Y0.	G91 G28 G00 Z0. M05	G90
X0. M05	(T03: broca de 1/4)	M30
(T02: broca de 9/64)	T03 M06	M02
	G43 H03	%

Pared lateral 2 del sistema de transmisión mecánica

%	T02 M06	M08
O00288	G43 H02	G83 G98 F5. Z-0.550
G20 G17 G80 G40 G49	M03 S1000	I0.140 J0.100 K0.050
G54 G90	G90	R0.1
G28 W0.0	G00 X3.6224 Y-1.1713	G00 Z0.1 M09
G28 U0.0	G00 Z1.0	G91 G28 G00 Z0. M05
G28 V0.0	G01 Z 0.1 F5.0	(T04: cortador de 3/8)
(T01: broca de centros)	M08	T04 M06
T01 M06	G83 G98 F5. Z-0.550	G43 H04
G43 H01	I0.140 J0.100 K0.050	M03 S1000
M03 S1000	R0.1	G90
G00 X3.6224 Y-1.1713	(X3.6224 Y-1.1713)	G00 X0.9843 Y-1.0236
G00 Z1.0	X3.6224 Y-0.4807	G00 Z1.0
G01 Z 0.1 F5.0	X0.3146 Y-1.1713	G01 Z0.1 F5.
M08	X0.3146 Y-0.4807	G01 Z0. F5.
G82 G98 F2.5 Z-0.200	G00 Z0.1 M09	M08
P1. R0.1	G91 G28 G00 Z0. M05	G12 G91 I0. K0.0880
(X3.6224 Y-1.1713)	(T03: broca de ¼)	Q0.03 F10. Z-0.020 L12
X3.6224 Y-0.4807	T03 M06	D0
X0.3146 Y-1.1713	G43 H03	G00 G90 Z1. M09
X0.3146 Y-0.4807	M03 S1000	G91 G28 G00 Z0. M05
X0.9843 Y-1.0236	G90	G90
G00 Z0.5 M09	G00 X0.9843 Y-1.0236	M30
G91 G28 G00 Z0. M05	G00 Z1.0	M02
(T02: broca de 9/64)	G01 Z0.1 F5.	%

Pared lateral 3 del sistema de transmisión mecánica

%	M03 S1000	(T04: broca de 3/8)
O00289	G90	T04 M06
G20 G17 G80 G40 G49	G00 X0.2437 Y1.9291	G43 H04
G54 G90	G00 Z1.0	M03 S1000
G28 W0.0	G01 Z 0.1 F5.0	G90
G28 U0.0	M08	G00 X1.1693 Y1.6614 Z1.0
G28 V0.0	G83 G98 F5. Z-0.550 I0.140 J0.100 K0.050 R0.1	G01 Z0.1 F5.
(T01: broca de centros)		G01 Z0. F5.
T01 M06	X0.2437 Y0.3937	M08
G43 H01	X2.9059 Y1.9291	G12 G91 I0. K0.0880 Q0.03 F10. Z-0.020 L12 D0
M03 S1000	X2.9059 Y0.3937	G00 G90 Z0.1 M09
G00 X0.2437 Y1.9291	G00 Z0.1 M09	G91 G28 G00 Z0. Y0. X0. M05
G00 Z 1.0	G91 G28 G00 Z0. Y0. X0. M05	(T03: broca de 1/4)
G01 Z 0.1 F5.0	(T03: broca de 1/4)	G90
M08	T03 M06	M30
G82 G98 F2.5 Z-0.200 P1. R0.1	G43 H03	M02
(X0.2437 Y1.9291)	M03 S1000	
X0.2437 Y0.3937	G90	
X2.9059 Y1.9291	G00 X1.1693 Y1.6614	
X2.9059 Y0.3937	Z1.	
X1.1693 Y1.6614	G01 Z0.1 F5.	
G00 Z0.1 M09	M08	
G91 G28 G00 Z0. Y0. X0. M05	G83 G98 F5. Z-0.550 I0.140 J0.100 K0.050 R0.1	
(T05: broca de 11/64)	G00 Z0.1 M09	
T05 M06	G91 G28 G00 Z0. Y0. X0. M05	
G43 H05		

Pared lateral 4 del sistema de transmisión mecánica

%	(T05: broca de 11/64)	G83 G98 F5. Z-0.550
O00290	T05 M06	I0.140 J0.100 K0.050
G20 G17 G80 G40	G43 H05	R0.1
G49	M03 S1000	G00 Z0.1 M09
G54 G90	G90	G91 G28 G00 Z0. Y0.
G28 W0.0	G00 X0.2437 Y-	X0. M05
G28 U0.0	1.9291	(T04: cortador de 3/8)
G28 V0.0	G00 Z1.0	T04 M06
(T01: broca de	G01 Z 0.1 F5.0	G43 H04
centros)	M08	M03 S1000
T01 M06	G83 G98 F5. Z-0.550	G90
G43 H01	I0.140 J0.100 K0.050	G00 X1.1693 Y-
M03 S1000	R0.1	1.6614 Z1.0
G00 X0.2437 Y-	X0.2437 Y-0.3937	G01 Z0.1 F5.
1.9291	X2.9059 Y-1.9291	G01 Z0. F5.
G00 Z 1.0	X2.9059 Y-0.3937	M08
G01 Z 0.1 F5.0	G00 Z0.1 M09	G12 G91 I0. K0.0880
M08	G91 G28 G00 Z0. Y0.	Q0.03 F10. Z-0.020
G82 G98 F2.5 Z-	X0. M05	L12 D0
0.200 P1. R0.1	(T03: broca de 1/4)	G00 G90 Z0.1 M09
(X0.2437 Y-1.9291)	T03 M06	G91 G28 G00 Z0. Y0.
X0.2437 Y-0.3937	G43 H03	X0. M05
X2.9059 Y-1.9291	M03 S1000	G90
X2.9059 Y-0.3937	G90	G28 W0.0
X1.1693 Y-1.6614	G00 X1.1693 Y-	G28 U0.0
G00 Z0.1 M09	1.6614	G28 V0.0
G91 G28 G00 Z0. Y0.	Z1.	M30
X0. M05	G01 Z0.1 F5.	M02
	M08	%

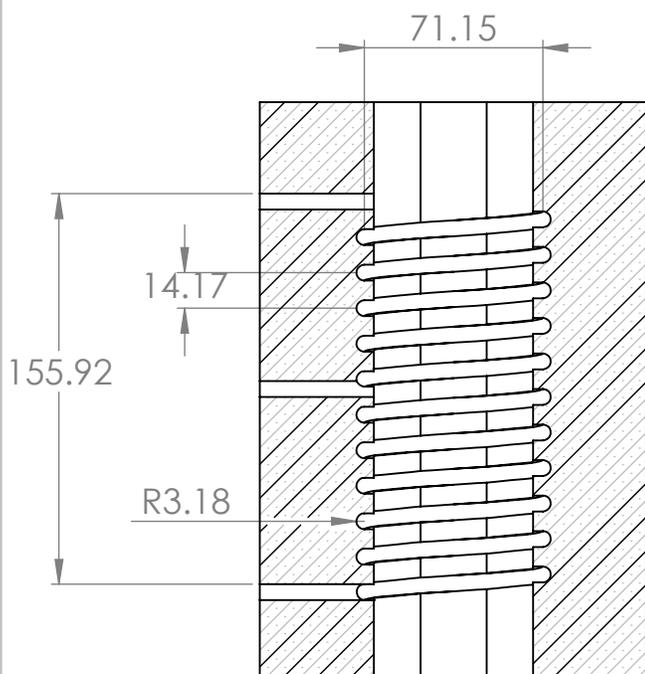
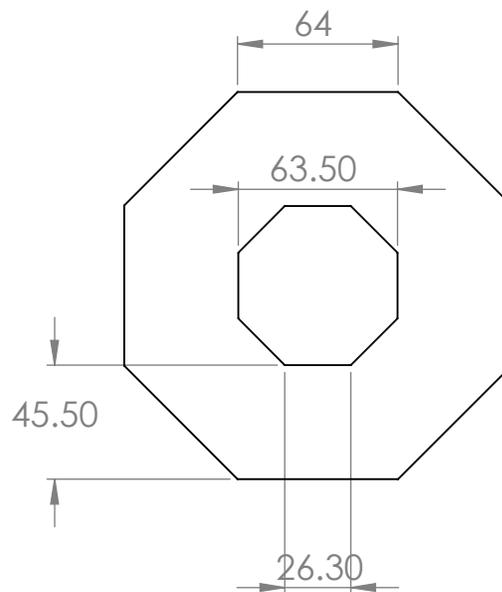
ANEXO 3. PLANOS DE PIEZAS Y ENSAMBLES

2

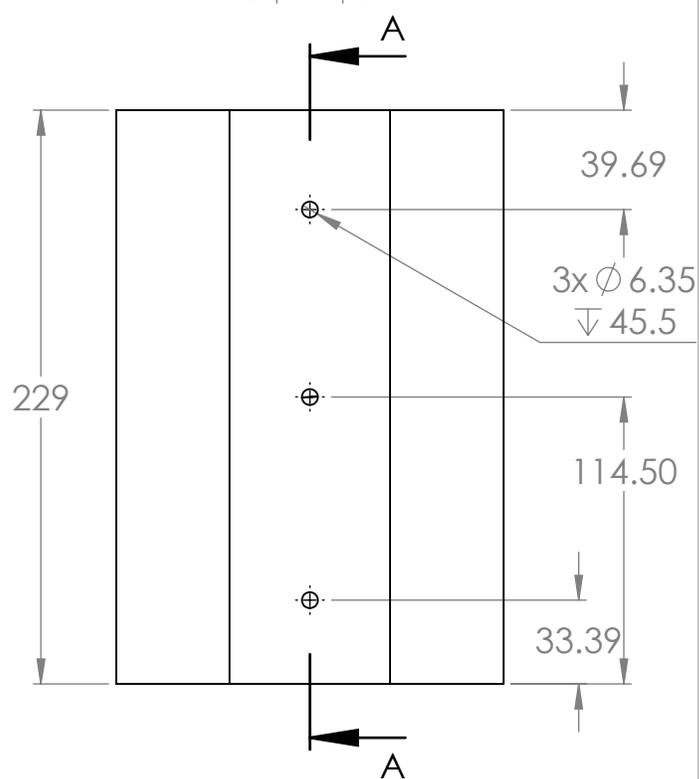
1

B

B



SECTION A-A
SCALE 1 : 3



A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



PIEZA:

ESTRUCTURA DE LADRILLOS OCTAGONAL

Integrantes

Diego Alexis Villagrana Arteaga

Osmar Jair Villagrana Prieto

Alberto Antonio Yuballe Kalixto

MATERIAL:

LADRILLO REFRACTARIO

ACABADO

SISTEMA BRIDGMAN

UNIDADES:

MM

TAMANO N.º DE DIBUJO

A

1

REV.

ESCALA: 1:3

HOJA 1 DE 22

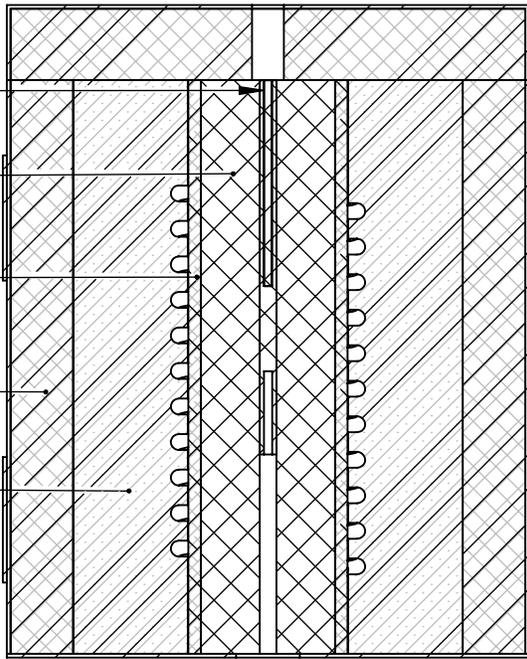
2

1

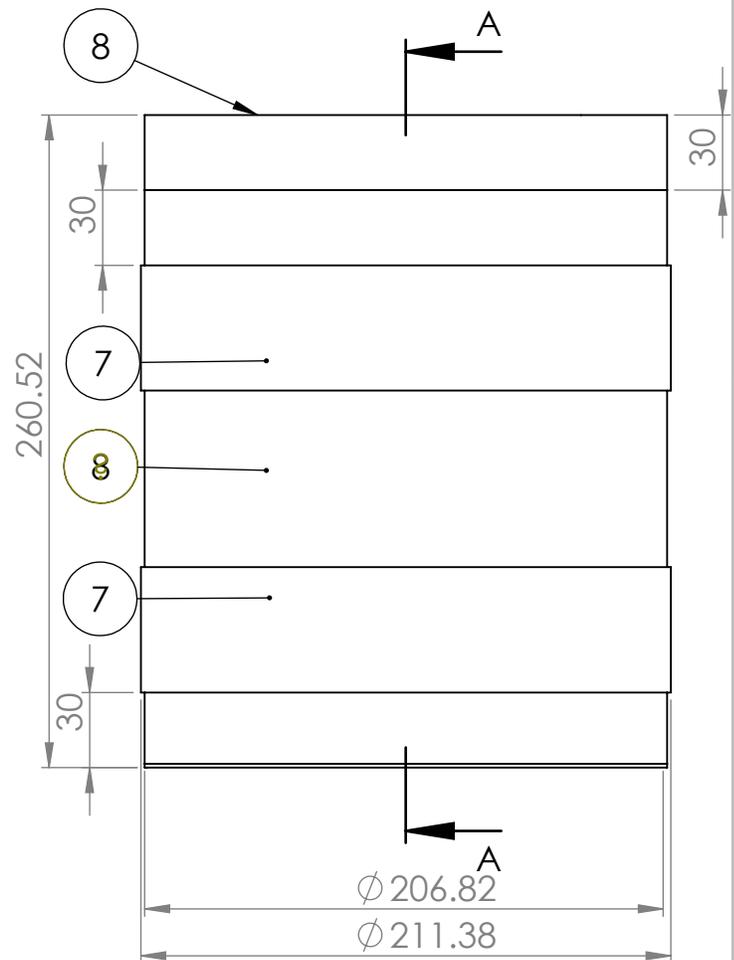
2

1

NO.	NOMBRE	MATERIAL	CANT.
1	Crisol	Grafito	1
2	Susceptor	Grafito	1
3	Tubo interior	Alúmina	1
4	Aislante	Fibra cerámica	1
8	Estructura de ladrillo octagonal	Ladrillo refractario	1
6	Tapadera de horno	Acero rolado en frío	1
7	Anillos de horno	Acero rolado en frío	2
8	Recubrimiento de horno	Acero rolado en frío	1



SECTION A-A
SCALE 1 : 3



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



ENSAMBLE:

HORNO

Integrantes

Diego Alexis Villagrana Arteaga

Osmar Jair Villagrana Prieto

Alberto Antonio Yuballe Kalixto

MATERIAL:

ACABADO

UNIDADES:

MM

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

A

REV.

SISTEMA BRIDGMAN

ESCALA: 1:3

HOJA 2 DE 22

2

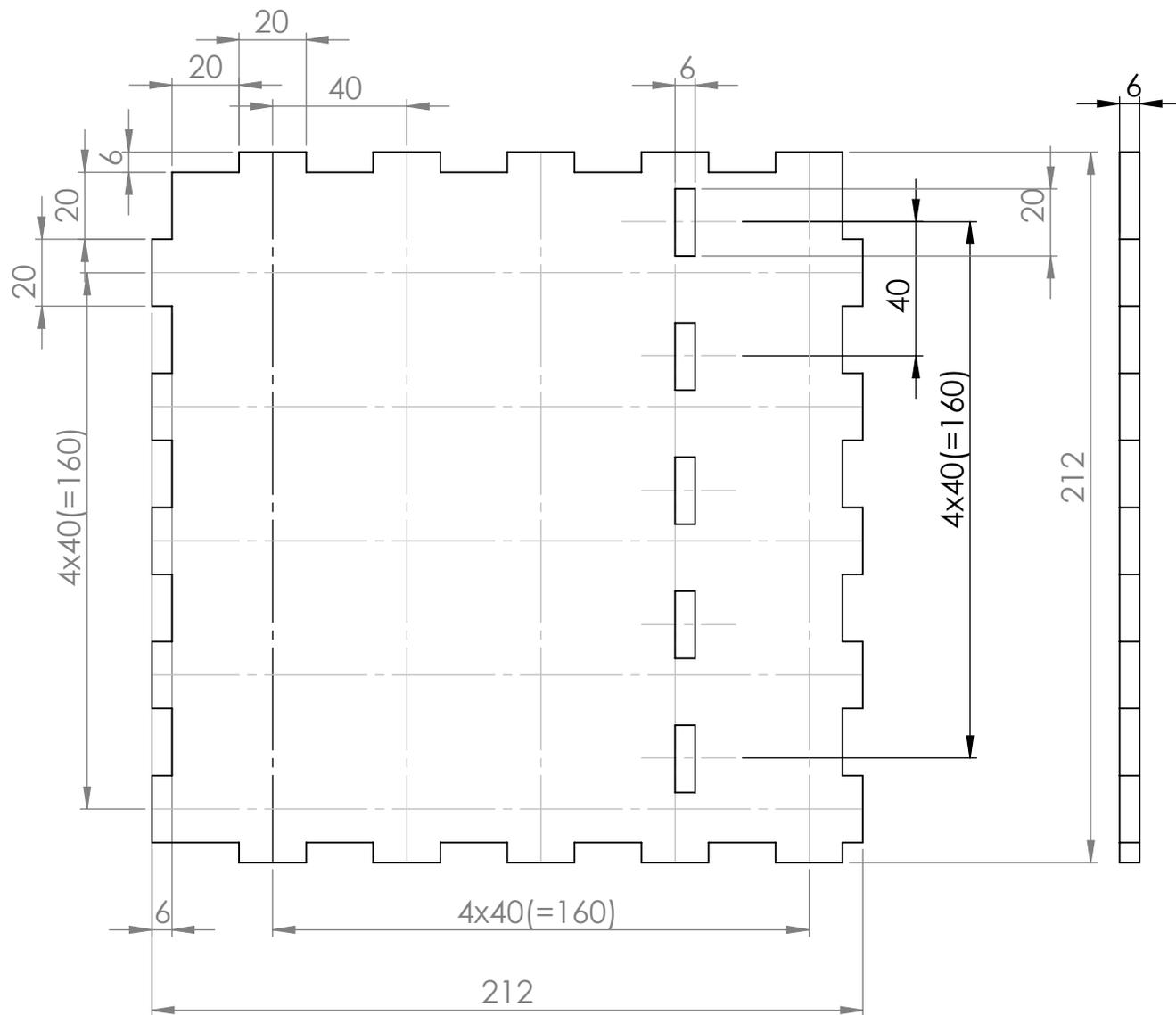
1

2

1

B

B



A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL UPIIZ



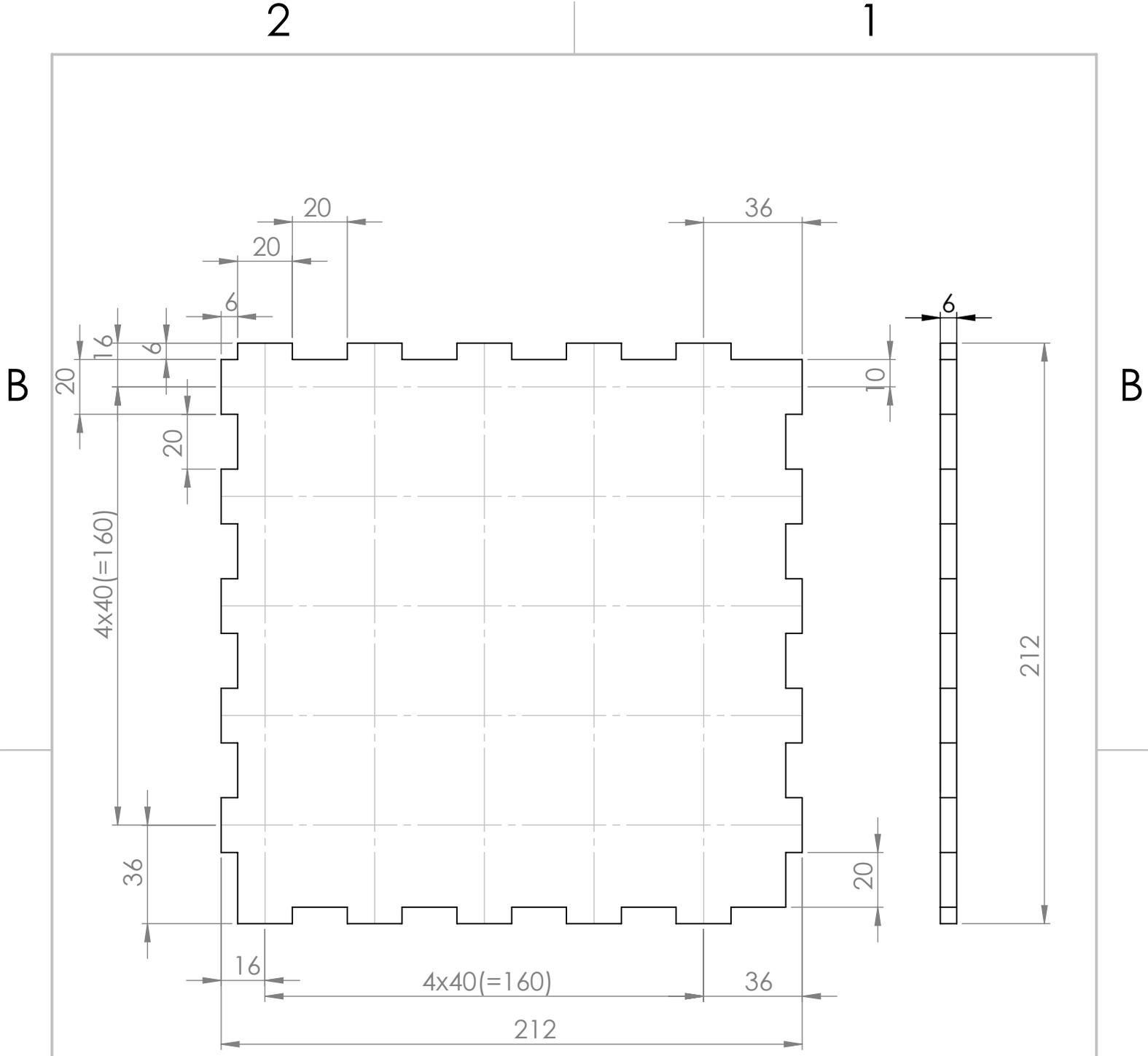
PIEZA:

PAREDES LATERALES 1 y 2 DE CÁMARA DE ENFRIAMIENTO

Integrantes	MATERIAL:	ACRÍLICO	UNIDADES:	MM
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	SISTEMA BRIDGMAN	TAMAÑO N.º DE DIBUJO	3
Osmar Jair Villagrana Prieto			A	REV.
Alberto Antonio Yuballe Kalixto			ESCALA: 1:2	HOJA 3 DE 22

2

1



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ**



PIEZA: **PAREDES LATERALES 3 y 4 DE CÁMARA DE ENFRIAMIENTO**

Integrantes	MATERIAL: ACRÍLICO	UNIDADES: MM	
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	TAMAÑO N.º DE DIBUJO	REV.
Osmar Jair Villagrana Prieto		A	4
Alberto Antonio Yuballe Kalixto	SISTEMA BRIDGMAN	ESCALA: 1:2	HOJA 4 DE 22

2

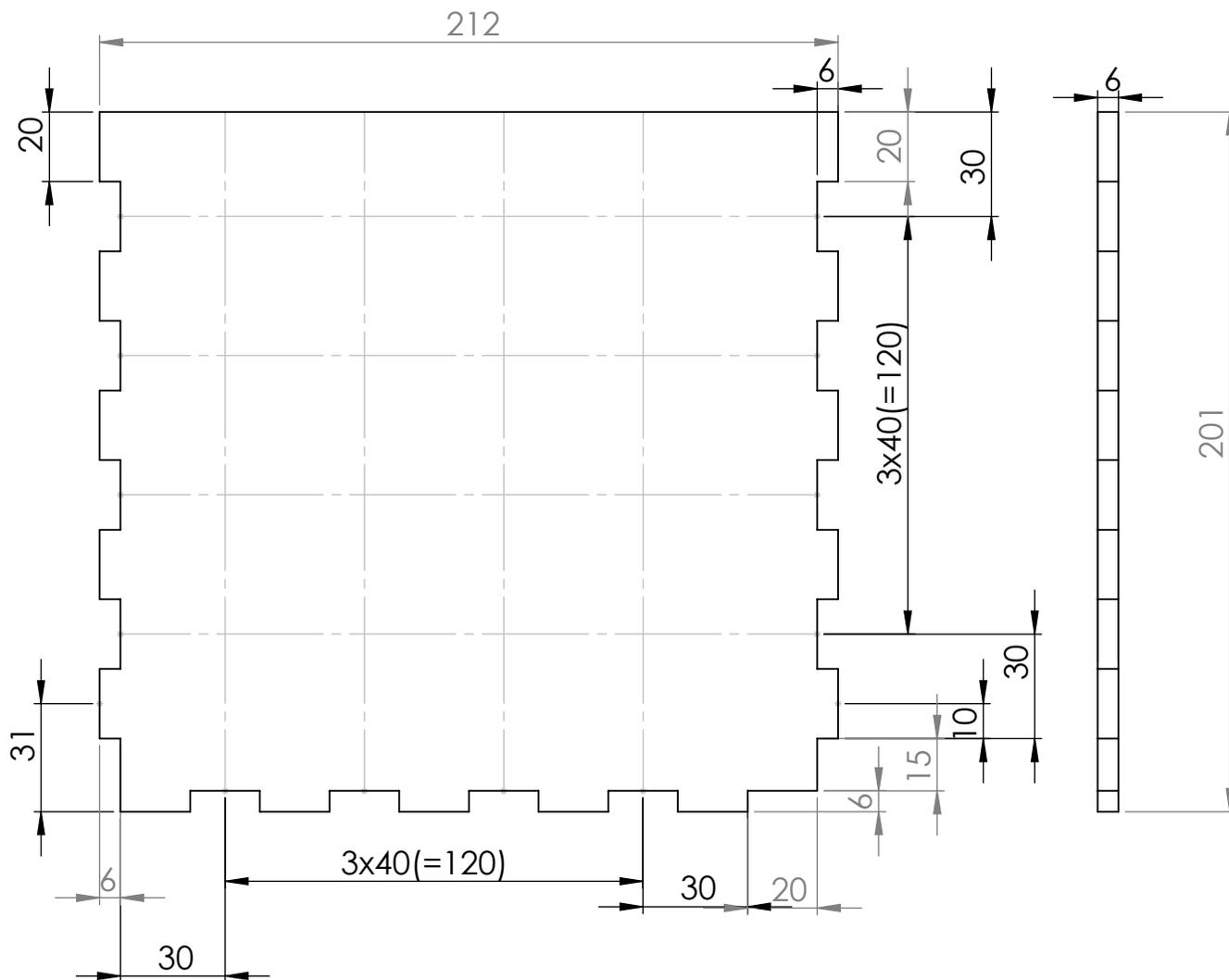
1

2

1

B

B



A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL UPIIZ



PIEZA:

PARED CENTRAL DE CÁMARA DE ENFRIAMIENTO

Integrantes

Diego Alexis Villagrana Arteaga

Osmar Jair Villagrana Prieto

Alberto Antonio Yuballe Kalixto

MATERIAL:

ACRÍLICO

ACABADO

SISTEMA BRIDGMAN

UNIDADES:

MM

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

A

5

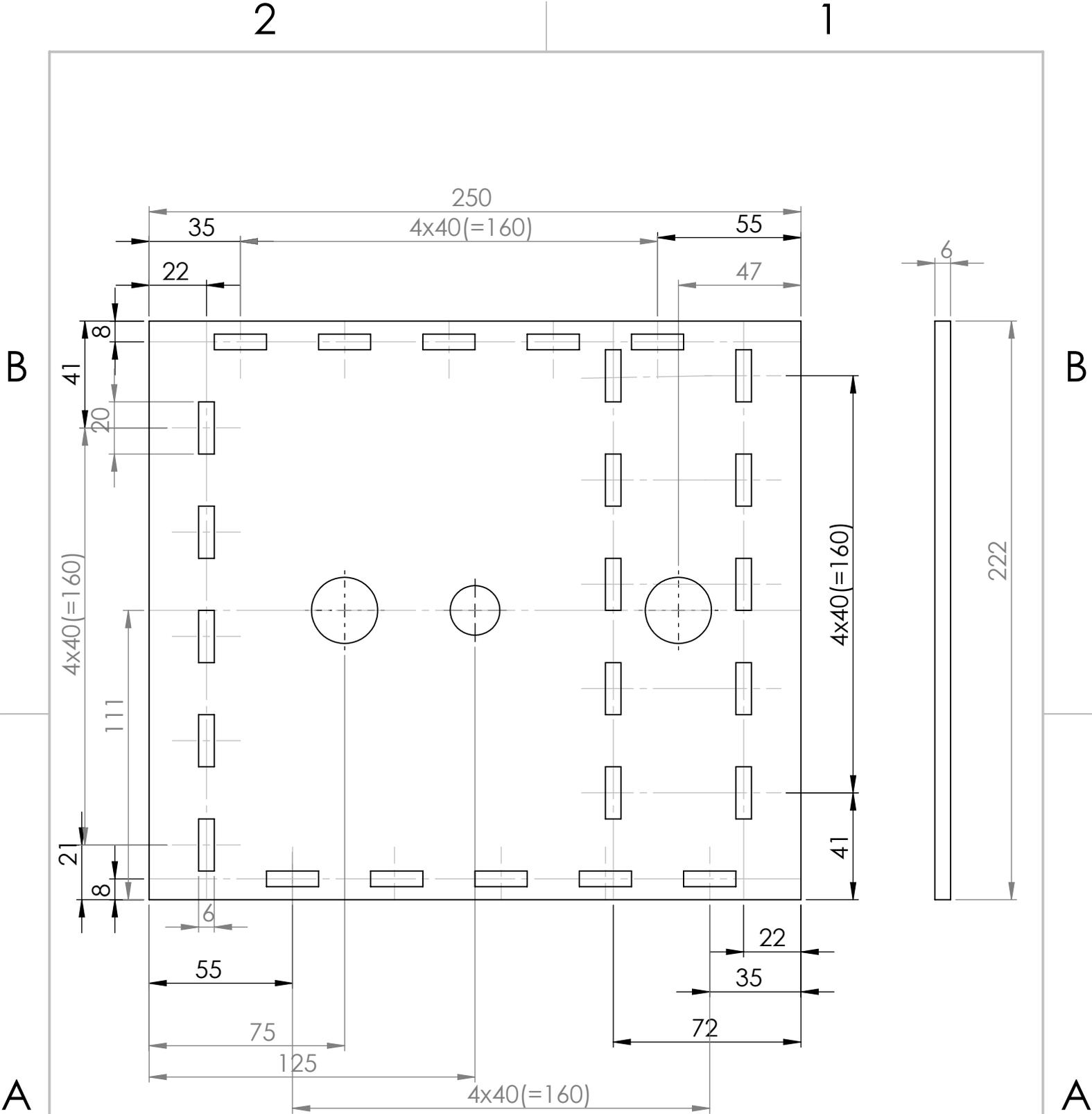
REV.

ESCALA:1:2

HOJA 5 DE 22

2

1



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL UPIIZ



PIEZA:

PARED INFERIOR DE CÁMARA DE ENFRIAMIENTO

Integrantes	MATERIAL: ACRÍLICO	UNIDADES: MM	
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	TAMAÑO N.º DE DIBUJO	6
Osmar Jair Villagrana Prieto		A	REV.
Alberto Antonio Yuballe Kalixto	SISTEMA BRIDGMAN	ESCALA: 1:2	HOJA 6 DE 22

2

1

2

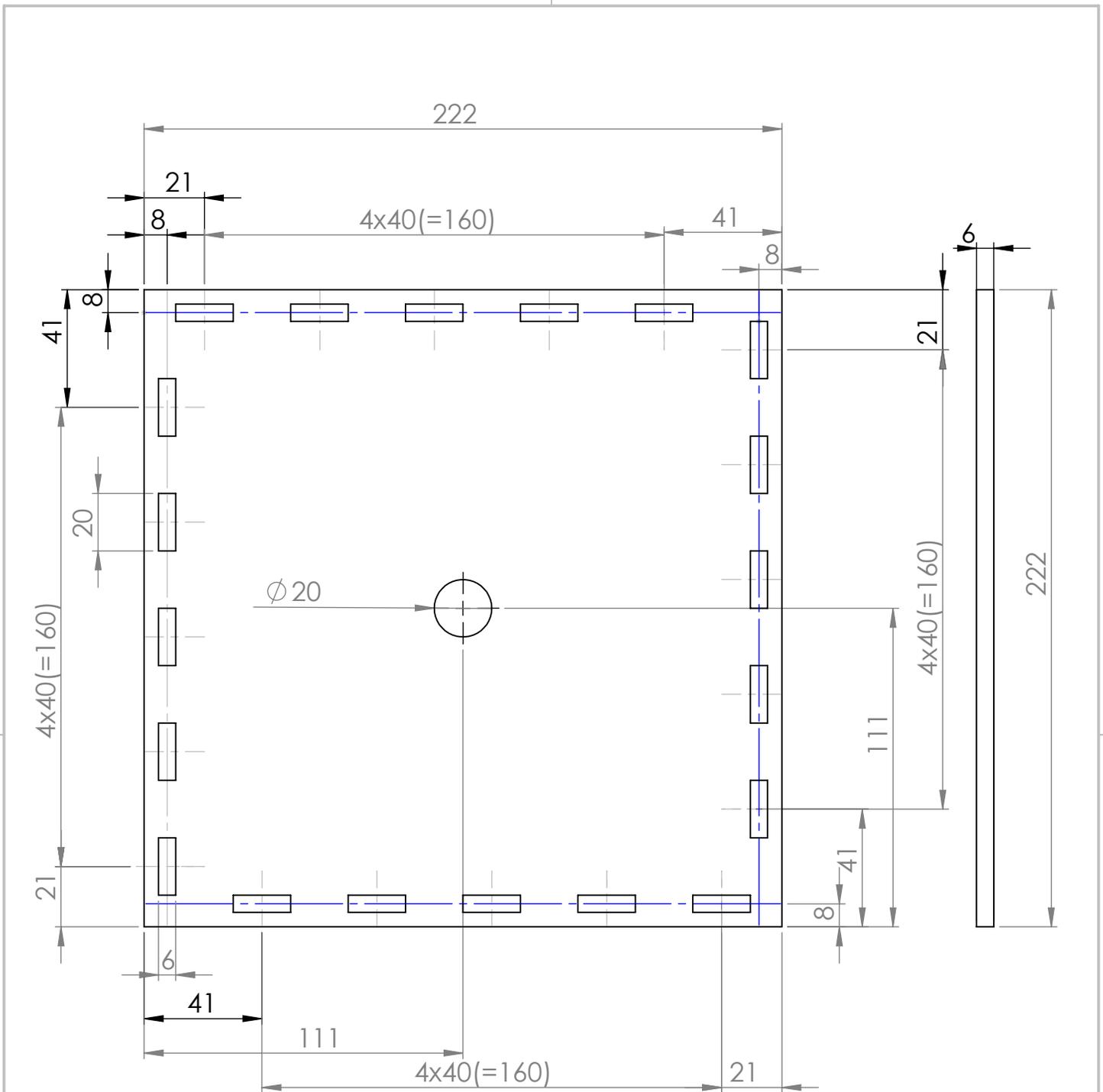
1

B

B

A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL UPIIZ



PIEZA:

PARED SUPERIOR DE CÁMARA DE ENFRIAMIENTO

Integrantes

Diego Alexis Villagrana Arteaga

Osmar Jair Villagrana Prieto

Alberto Antonio Yuballe Kalixto

MATERIAL:

ACRÍLICO

ACABADO

HORNO BRIDGMAN

UNIDADES:

MM

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

A

7

REV.

ESCALA:1:2

HOJA 7 DE 22

2

1

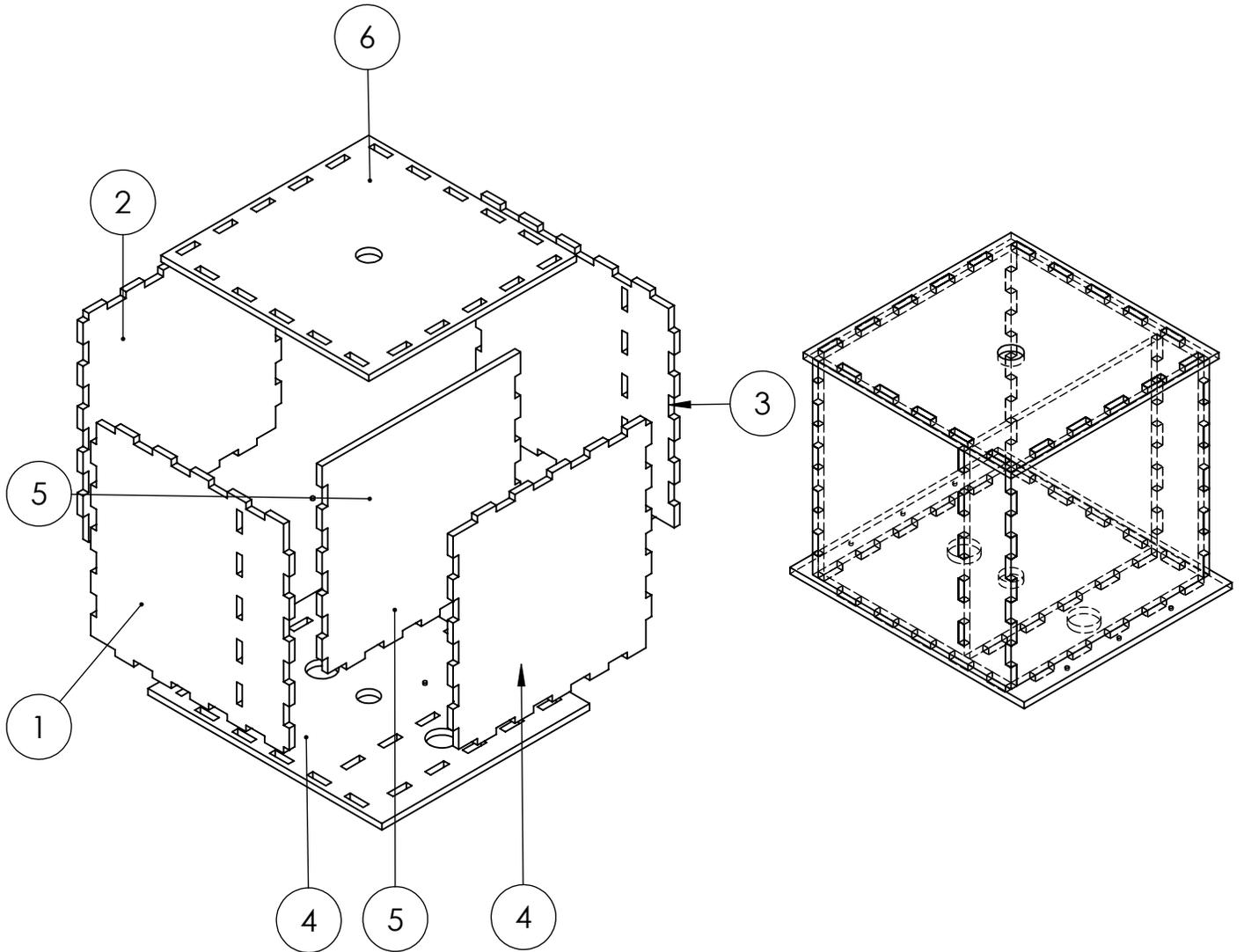
2

1

NO.	NOMBRE	CANT.
1	Pared lateral 1	1
2	Pared lateral 2	1
3	Pared lateral 3	1
4	Pared lateral 4	1
5	Pared central	1
6	Pared inferior	1
7	Pared superior	1

B

B



A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL UPIIZ



ENSAMBLE:

CÁMARA DE ENFRIAMIENTO

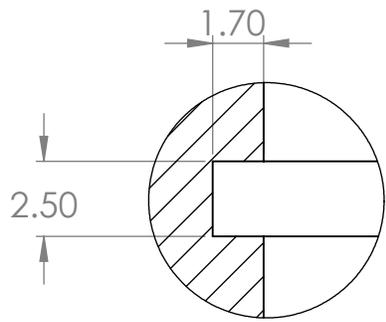
Integrantes	MATERIAL:	ACRÍLICO	UNIDADES:	MM	
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	SISTEMA BRIDGMAN	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO	REV.
Osmar Jair Villagrana Prieto			A	8	
Alberto Antonio Yuballe Kalixto			ESCALA: 1:5	HOJA 8 DE 22	

2

1

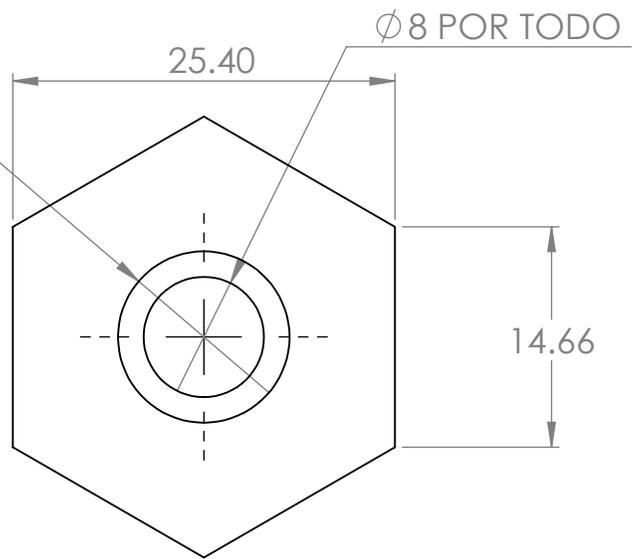
2

1



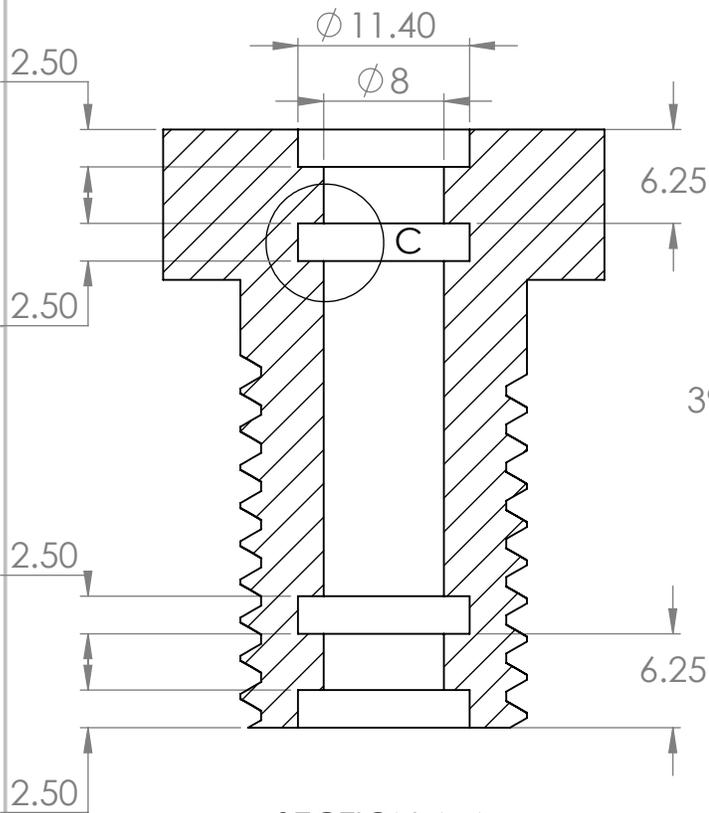
DETAIL C
SCALE 4 : 1

$\phi 11.40 \nabla 2.50$



B

B



SECTION A-A

39.80

6.25

2.50

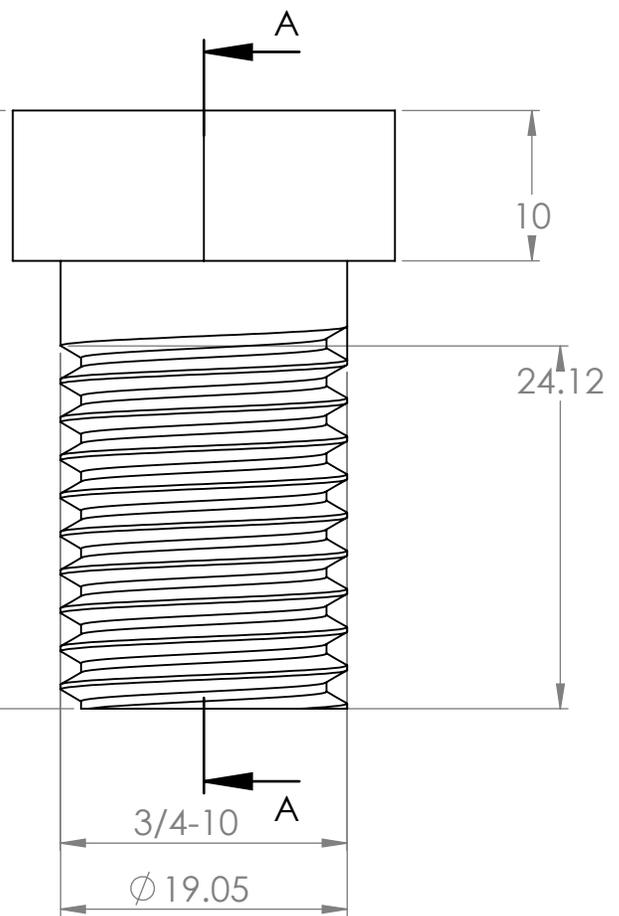
$\phi 11.40$

$\phi 8$

2.50

2.50

2.50



A

10

24.12

3/4-10

$\phi 19.05$

A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



PIEZA:

SELLO MECÁNICO

Integrantes
Diego Alexis Villagrana Arteaga
Osmar Jair Villagrana Prieto
Alberto Antonio Yuballe Kalixto

MATERIAL:	ALUMINIO 6061
ACABADO	SISTEMA BRIDGMAN

UNIDADES:	MM
TAMAÑO N.º DE DIBUJO	9
REV.	
ESCALA:	2:1
HOJA	9 DE 22

2

1

2

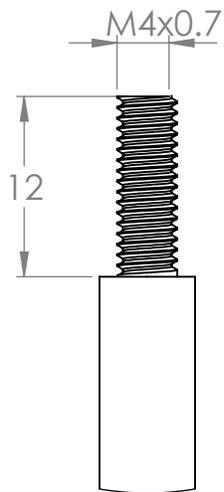
1

B

B

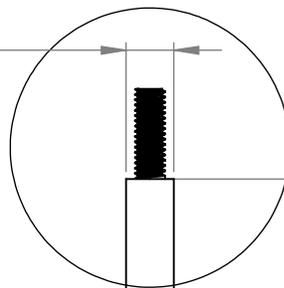
A

A



DETAIL A
SCALE 2 : 1

ϕ 6.35



A

380

ϕ 1.59 POR TODO

5



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



PIEZA:

BARRA GUÍA

Integrantes	MATERIAL:	LATÓN	UNIDADES:	MM
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO		TAMAÑO N.º DE DIBUJO	10
Osmar Jair Villagrana Prieto			A	REV.
Alberto Antonio Yuballe Kalixto		SISTEMA BRIDGMAN	ESCALA: 1:1	HOJA 10 DE 22

2

1

2

1

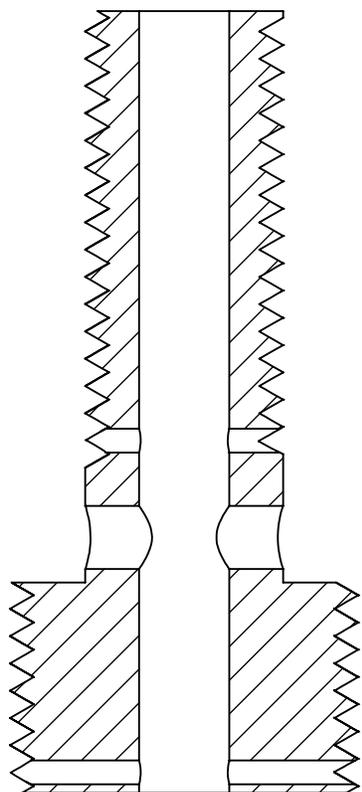
Ø 6 POR TODO

R6.57

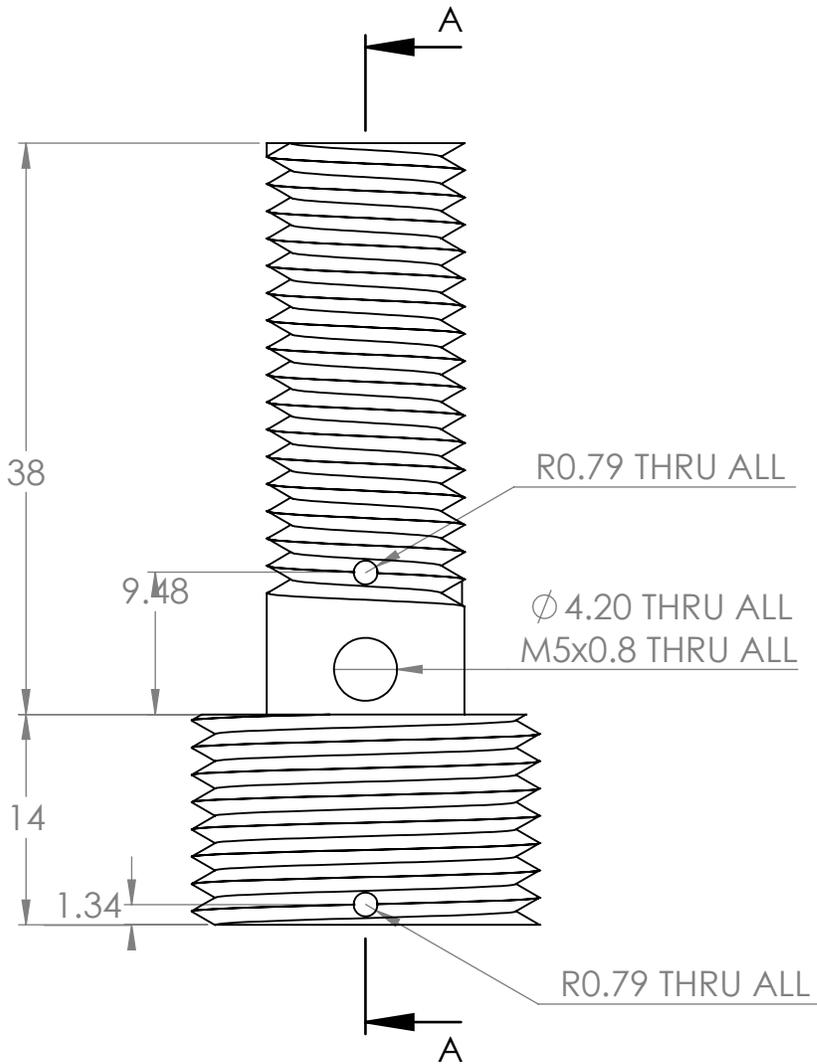
Ø 23.14

B

B



SECTION A-A



A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



PIEZA:

POLEA ROSCADA

Integrantes

MATERIAL:

ALUMINIO 6061

UNIDADES:

MM

Diego Alexis Villagrana Arteaga

ACABADO

TAMANO N.º DE DIBUJO

11

REV.

Osmar Jair Villagrana Prieto

A

SISTEMA BRIDGMAN

ESCALA: 2:1

HOJA 11 DE 22

Alberto Antonio Yuballe Kalixto

2

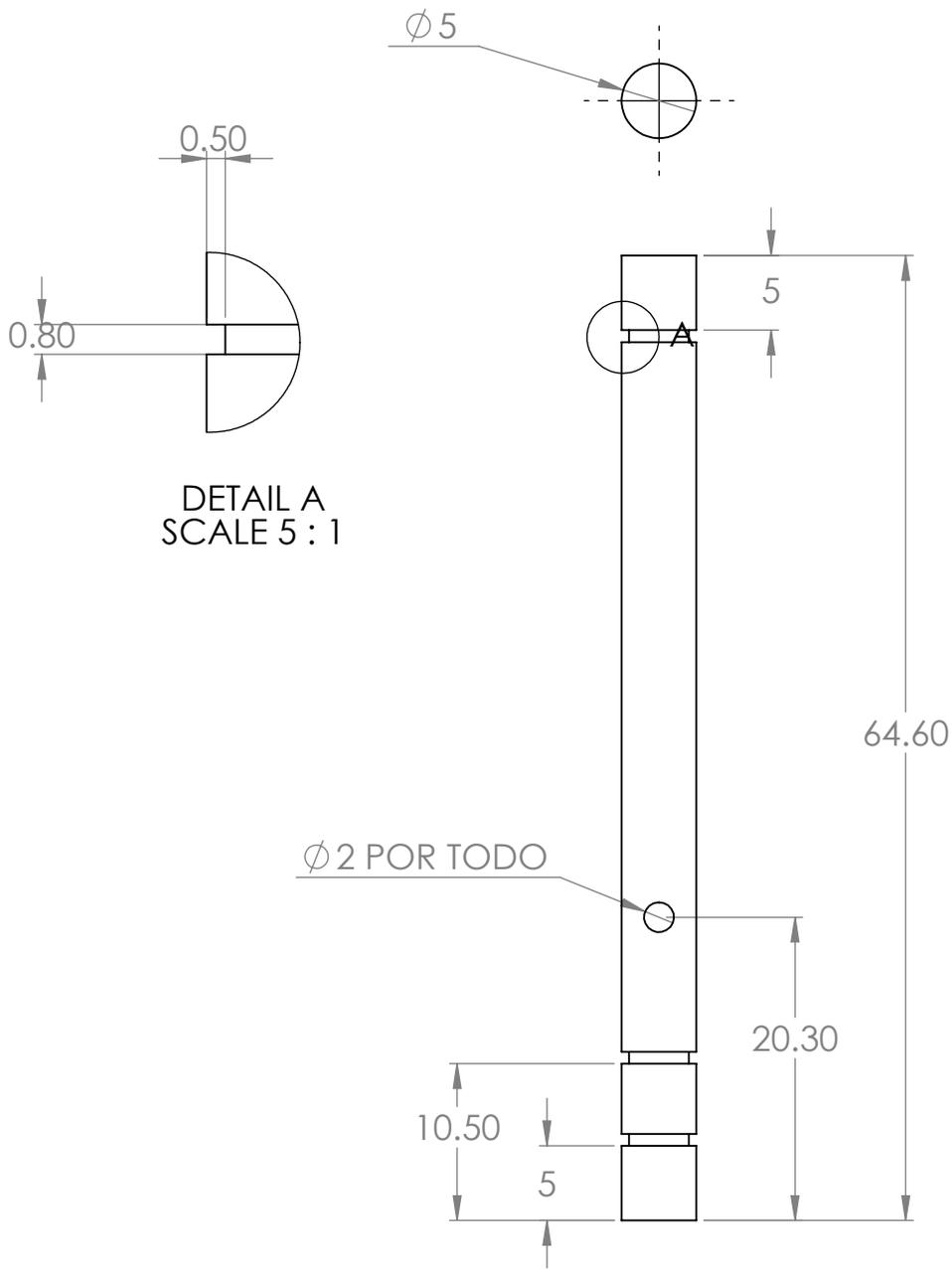
1

2

1

B

B



A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



PIEZA:

EJE DE TRANSMISIÓN 1

Integrantes	MATERIAL:	ACERO AISI 1018	UNIDADES:	MM
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	SISTEMA BRIDGMAN	TAMAÑO N.º DE DIBUJO	12
Osmar Jair Villagrana Prieto			A	REV.
Alberto Antonio Yuballe Kalixto			ESCALA: 2:1	HOJA 12 DE 22

2

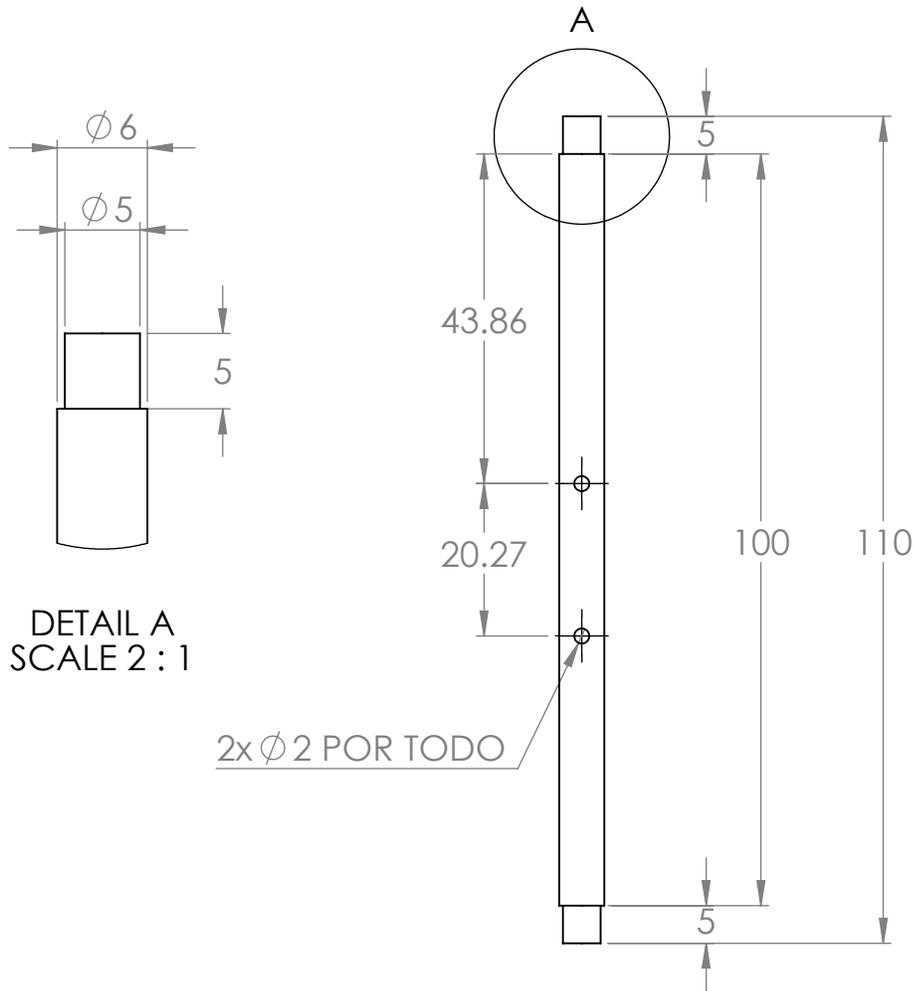
1

2

1

B

B



DETAIL A
SCALE 2 : 1

2x ϕ 2 POR TODO

A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL UPIIZ



PIEZA:

EJE DE TRANSMISIÓN 2

Integrantes	MATERIAL:	ACERO AISI 1018	UNIDADES:	MM
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	SISTEMA BRIDGMAN	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
Osmar Jair Villagrana Prieto			A	13
Alberto Antonio Yuballe Kalixto			ESCALA:1:1	HOJA 13 DE 22

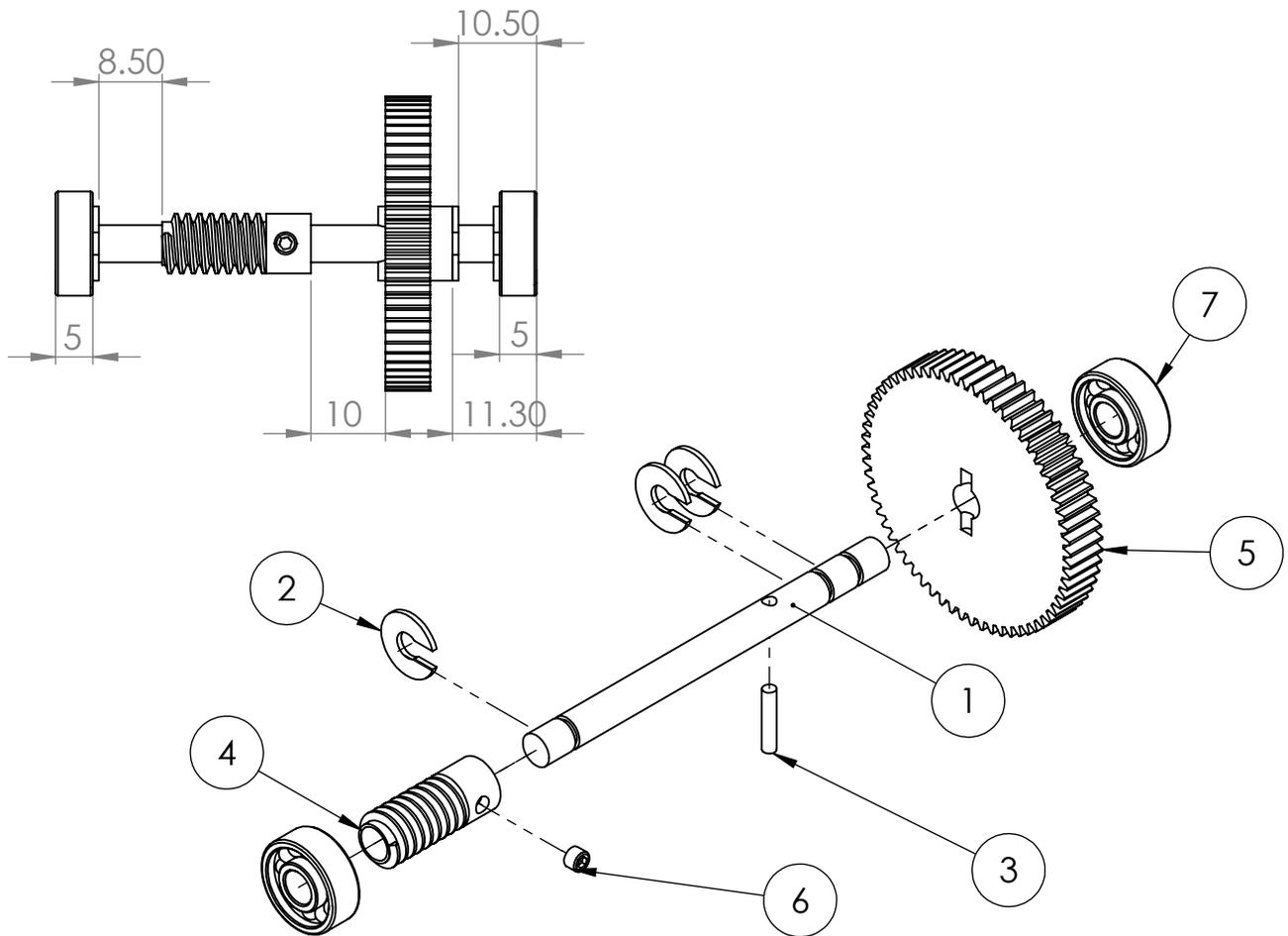
2

1

2

1

NO.	NOMBRE	MATERIAL	CANT.
1	Eje de transmisión 1	Acero AISI 1018	1
2	Anillo de retención	Acero	3
3	Seguro para engrane 64 dientes	Acero inoxidable	1
4	Tornillo sinfín 0.5M	Latón	1
5	Engranaje recto métrico 0.6M 64T	Acero	1
6	Opresor mecánico métrico M3 x 0.5 x 2.5	Acero	1
7	Rodamiento 5mm	Acero	2



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



ENSAMBLE:

EJE DE TRANSMISIÓN 1

Integrantes	MATERIAL:	UNIDADES:	MM
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
Osmar Jair Villagrana Prieto		A	14
Alberto Antonio Yuballe Kalixto	SISTEMA BRIDGMAN	ESCALA: 1:1	REV.
			HOJA 14 DE 22

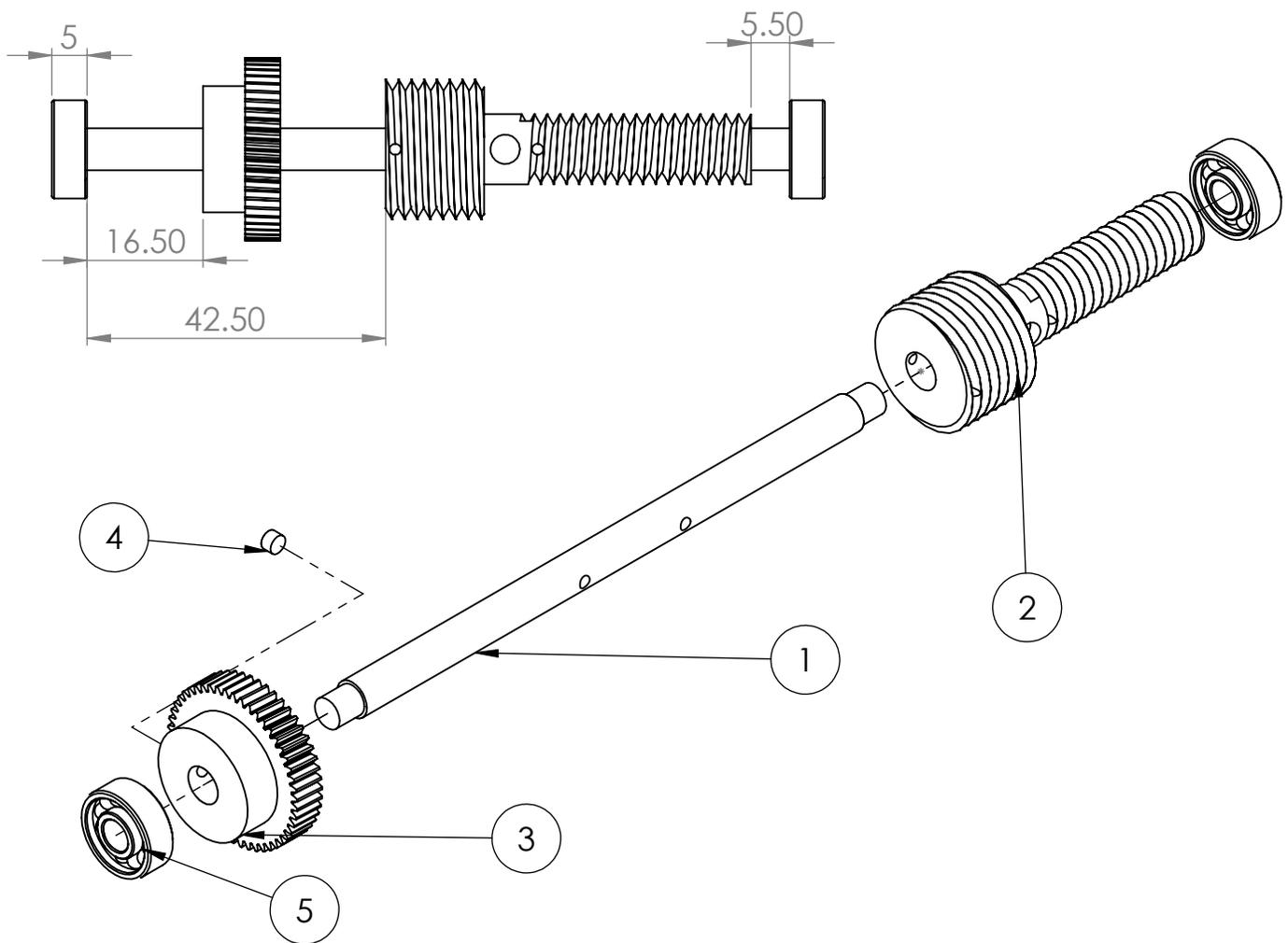
2

1

2

1

NO.	NOMBRE	MATERIAL	CANT.
1	Eje de transmisión 2	Acero AISI 1018	1
2	Polea roscada	Aluminio 6061	1
3	Engranaje helicoidal métrico 0.5M 50T	Latón	1
4	Opresor mecánico métrico M3 x 0.5 x 2.5	Acero	1
5	Rodamiento 5mm	Acero	2



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



ENSAMBLE:

EJE DE TRANSMISIÓN 2

Integrantes	MATERIAL:	UNIDADES:	MM
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
Osmar Jair Villagrana Prieto		A	15
Alberto Antonio Yuballe Kalixto			REV.
SISTEMA BRIDGMAN		ESCALA: 1:1	HOJA 15 DE 22

2

1

2

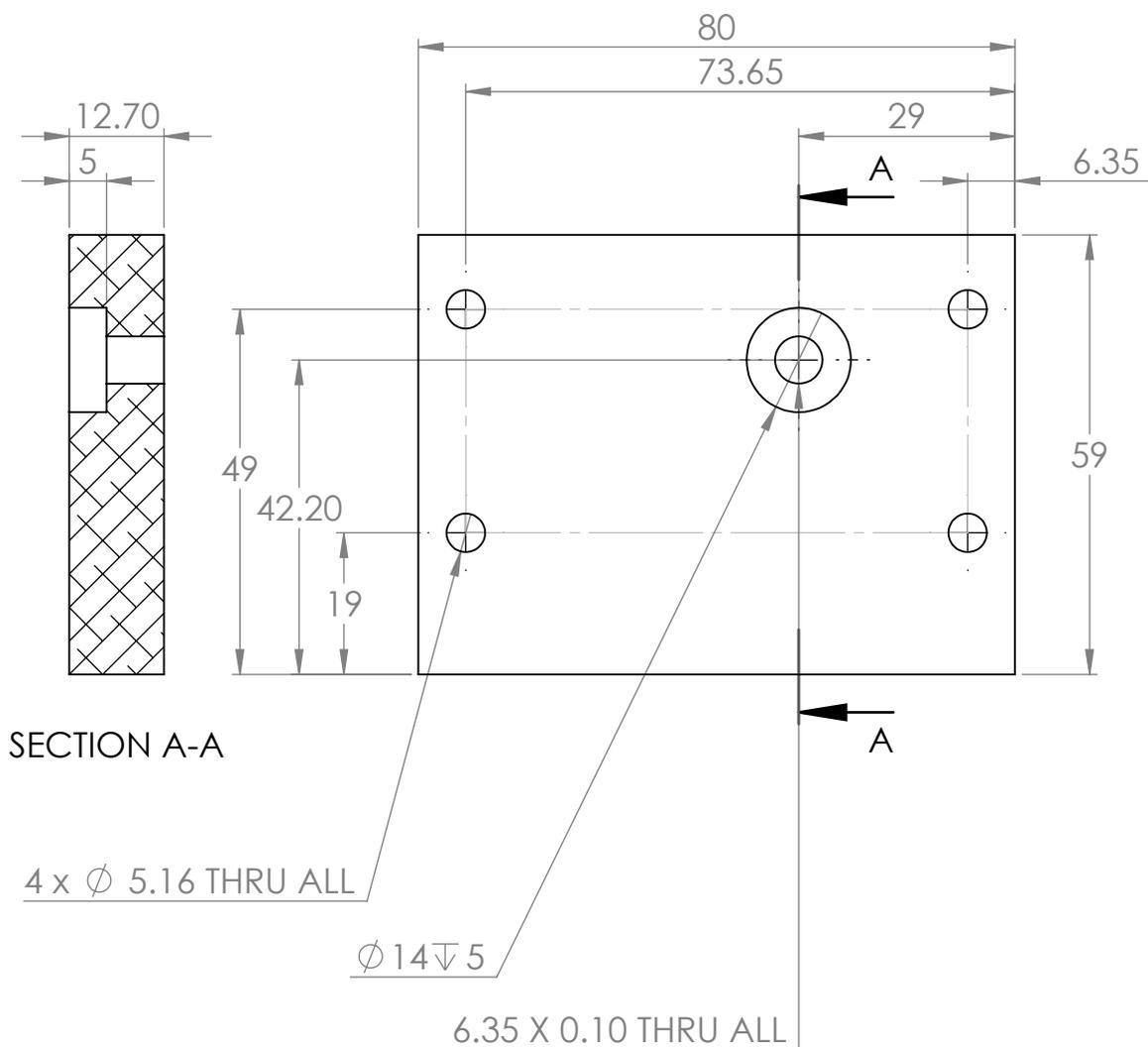
1

B

B

A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



PIEZA:

PARED LATERAL 2 DE CAJA DE TRANSMISIÓN

Integrantes

Diego Alexis Villagrana Arteaga

Osmar Jair Villagrana Prieto

Alberto Antonio Yuballe Kalixto

MATERIAL:

ALUMINIO 6061

ACABADO

SISTEMA BRIDGMAN

UNIDADES:

MM

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

A

17

REV.

ESCALA:1:1

HOJA 17 DE 22

2

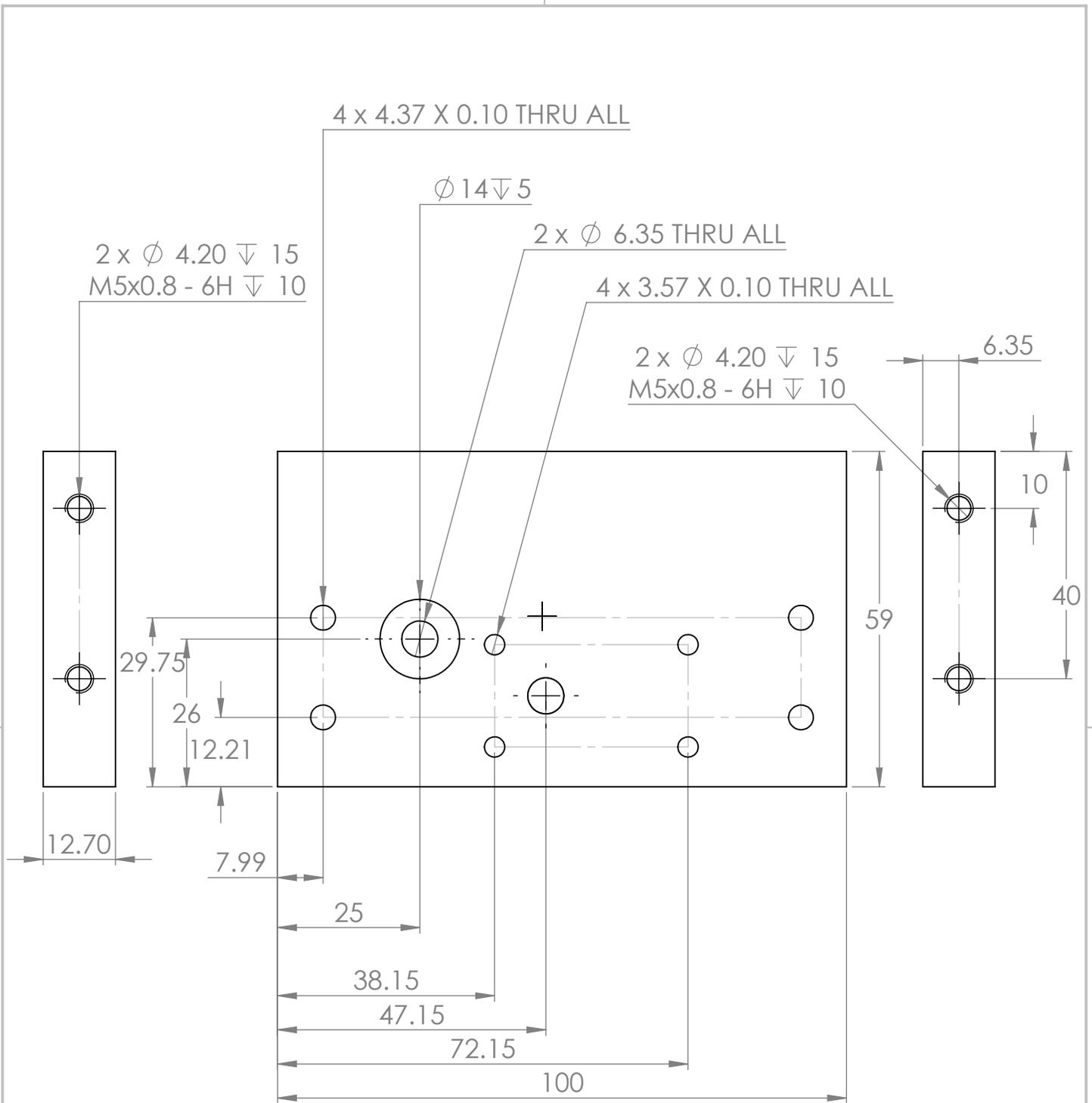
1

2

1

B

B



A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL UPIIZ



PIEZA:

PARED LATERAL 3 DE CAJA DE TRANSMISIÓN

Integrantes	MATERIAL:	ALUMINIO 6061	UNIDADES:	MM
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	SISTEMA BRIDGMAN	TAMAÑO N.º DE DIBUJO	18
Osmar Jair Villagrana Prieto			A	REV.
Alberto Antonio Yuballe Kalixto			ESCALA: 1:1	HOJA 18 DE 22

2

1

2

1

B

B

A

A

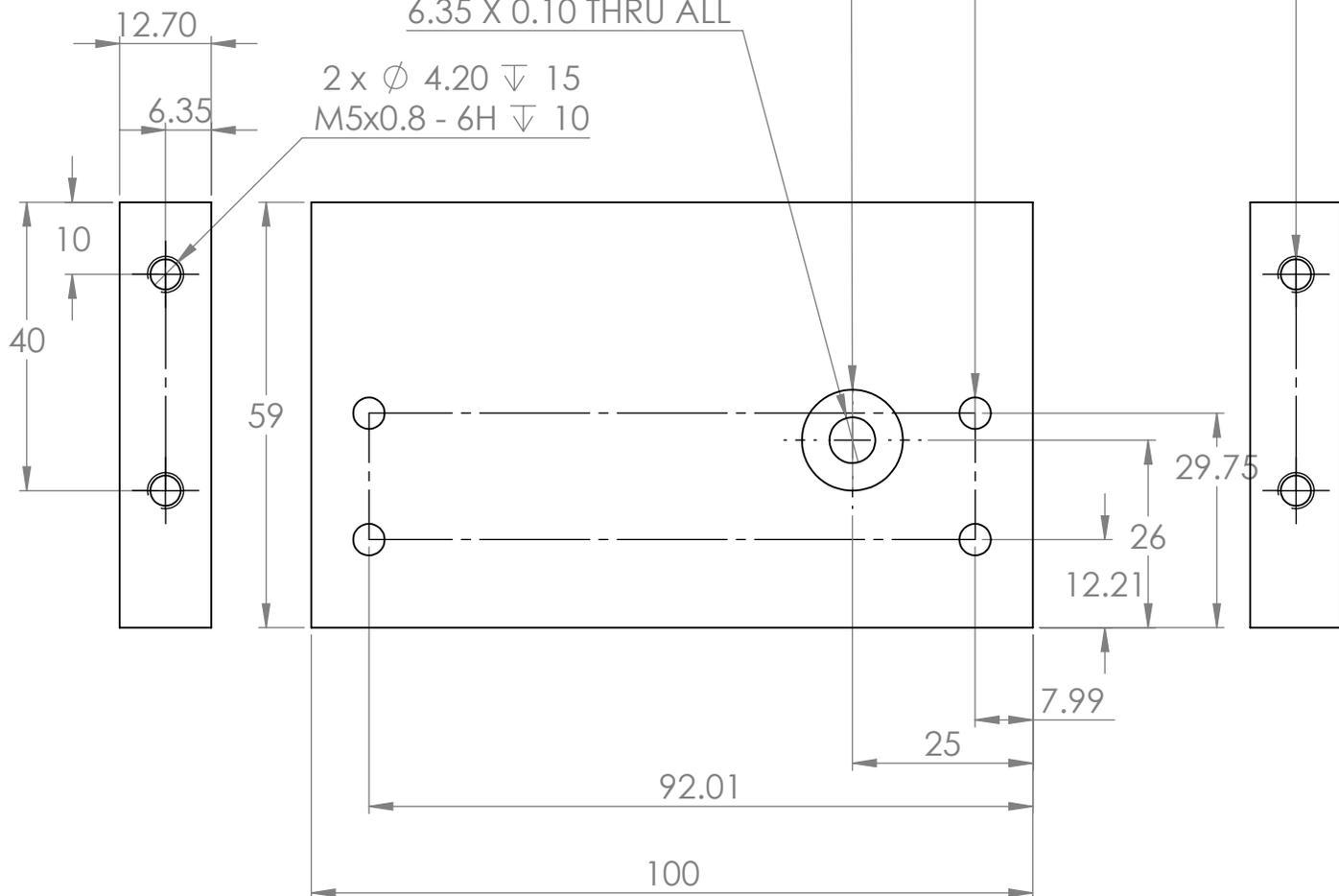
2 x ϕ 4.20 ∇ 15
M5x0.8 - 6H ∇ 10

4 x 4.37 X 0.10 THRU ALL

ϕ 14 ∇ 5

6.35 X 0.10 THRU ALL

2 x ϕ 4.20 ∇ 15
M5x0.8 - 6H ∇ 10



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



PIEZA:

PARED LATERAL 4 DE CAJA DE TRANSMISIÓN

Integrantes

Diego Alexis Villagrana Arteaga

Osmar Jair Villagrana Prieto

Alberto Antonio Yuballe Kalixto

MATERIAL:

ALUMINIO 6061

ACABADO

SISTEMA BRIDGMAN

UNIDADES:

MM

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

A

19

REV.

ESCALA:1:1

HOJA 19 DE 22

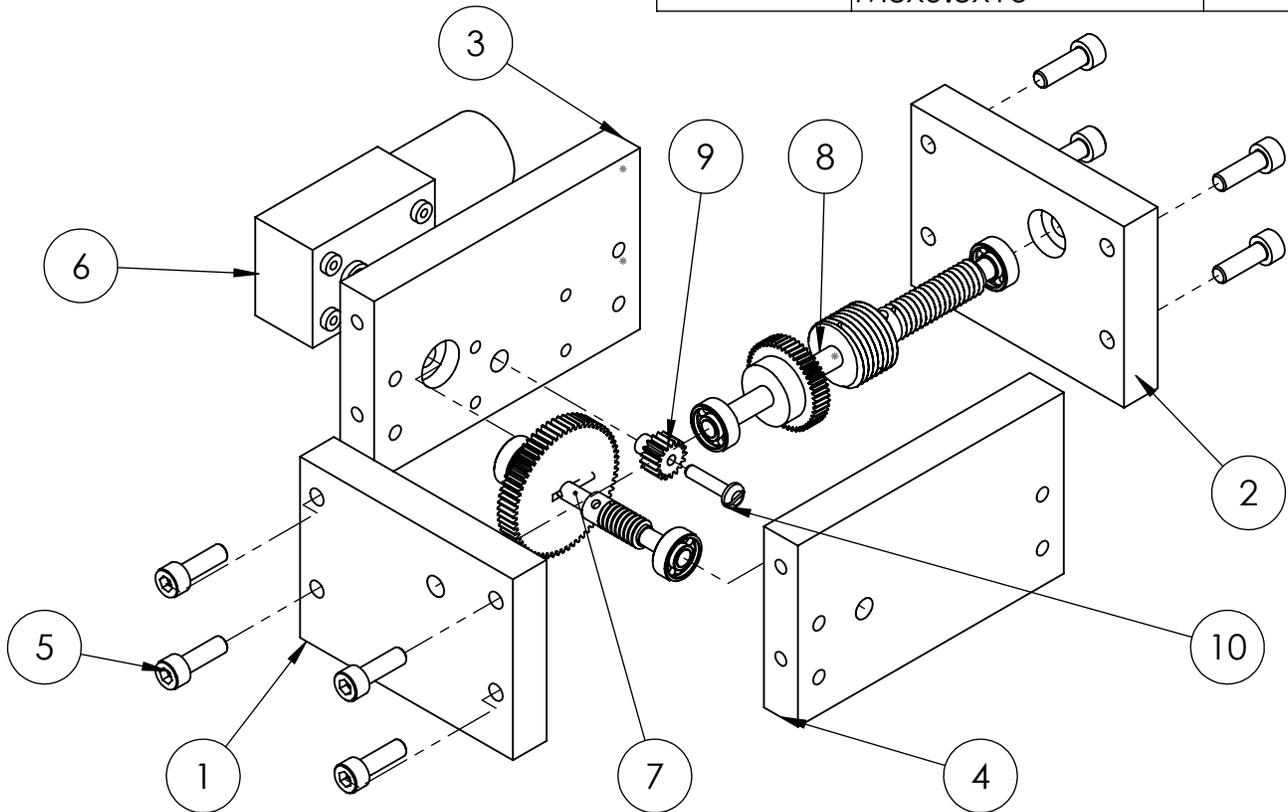
2

1

2

1

ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Pared lateral 1	1
2	Pared lateral 2	1
3	Pared lateral 3	1
4	Pared lateral 4	1
5	Tornillo métrico de cabeza cilíndrica M5x0.8x16 - 16N	8
6	Motor CD	1
7	Ensamble de eje de transmisión 1	1
8	Ensamble de eje de transmisión 2	1
9	Engranaje recto métrico 0.6M 17T	1
10	Tornillo métrico M3x0.5x16	1



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL UPIIZ



ENSAMBLE:

CAJA DE TRANSMISIÓN MECÁNICA

Integrantes

Diego Alexis Villagrana Arteaga

Osmar Jair Villagrana Prieto

Alberto Antonio Yuballe Kalixto

MATERIAL:

ACABADO

UNIDADES:

MM

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

A

20

REV.

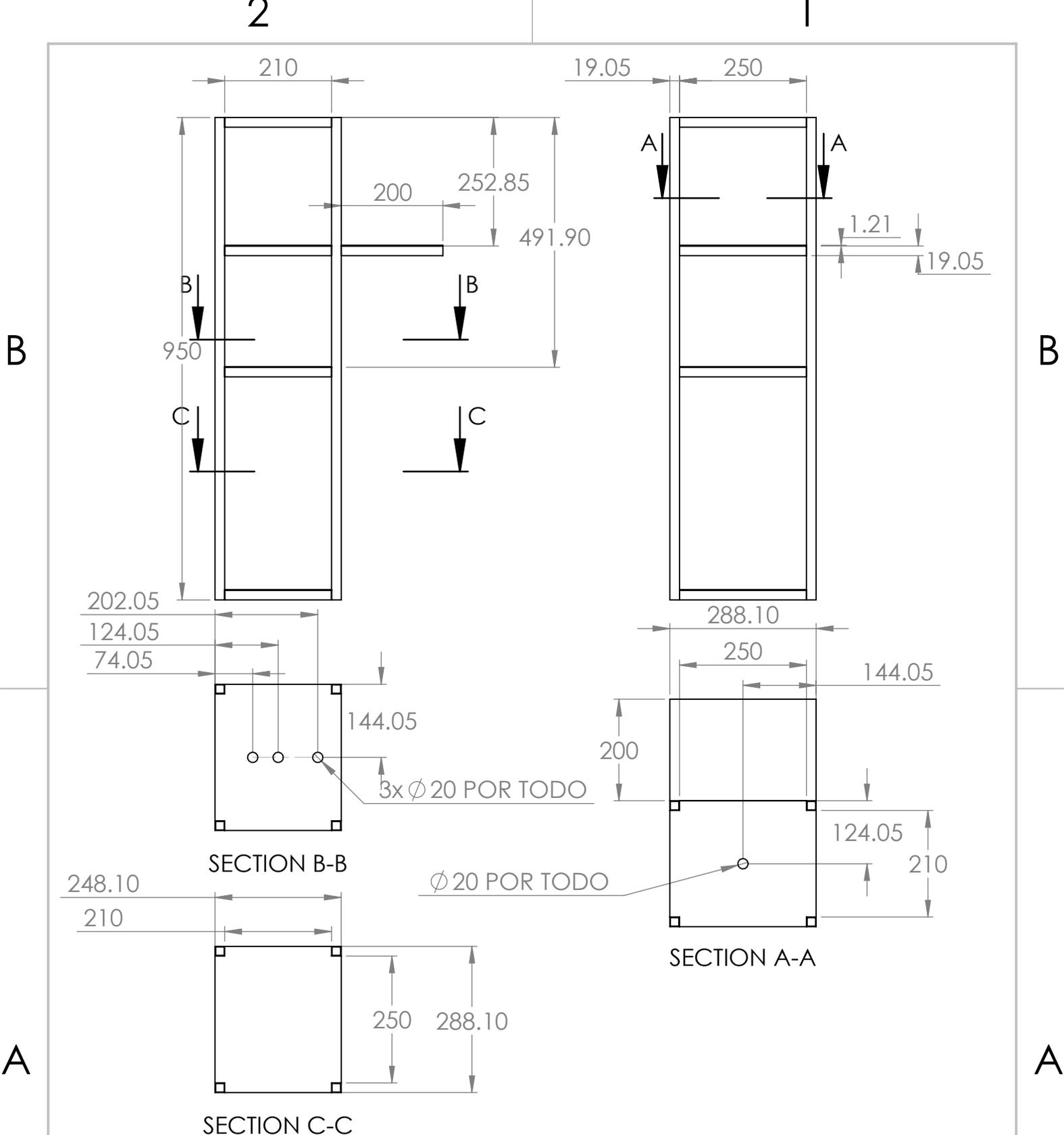
SISTEMA BRIDGMAN

ESCALA: 1:2

HOJA 20 DE 22

2

1



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ**



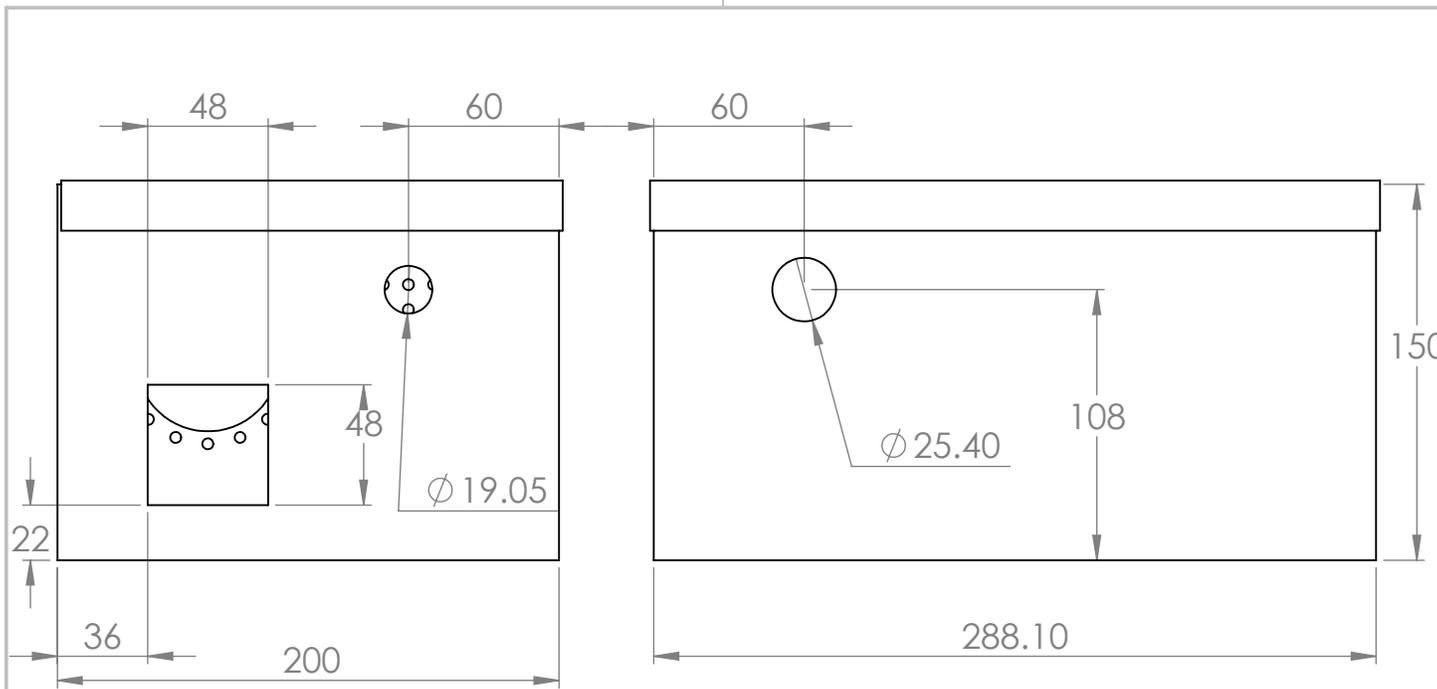
PIEZA:		ESTRUCTURA PARA ACOPLAMIENTO DE SISTEMAS			
Integrantes	MATERIAL:	ACERO	UNIDADES:	MM	
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	SISTEMA BRIDGMAN	TAMANO	N.º DE DIBUJO	
Osmar Jair Villagrana Prieto			A	21	
Alberto Antonio Yuballe Kalixto			ESCALA: 1:10	HOJA 21 DE 22	

2

1

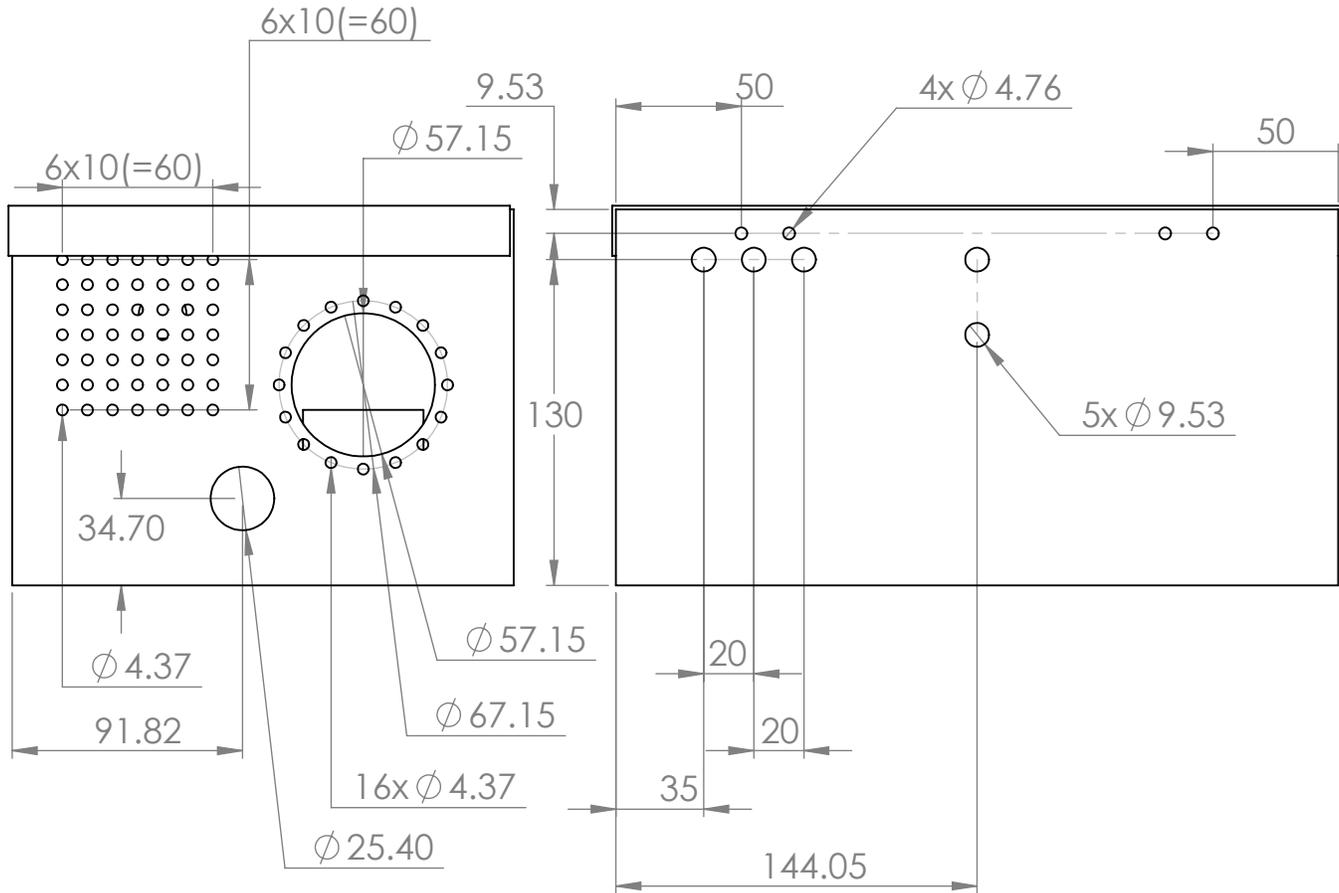
B

B



A

A



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UPIIZ



ENSAMBLE:

GABINETE ELÉCTRICO

Integrantes	MATERIAL:	ACERO	UNIDADES:	MM
Diego Alexis Villagrana Arteaga	ACABADO	SISTEMA BRIDGMAN	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
Osmar Jair Villagrana Prieto			A	22
Alberto Antonio Yuballe Kalixto			ESCALA: 1:3	HOJA 22 DE 22

2

1