



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

CARACTERIZACIÓN DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO APLICADO A SEMICONDUCTORES

**TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA
PROFESIONAL**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERÍA MECATRÓNICA

PRESENTA:
ALBERTO PICHÓN MARTINEZ

NOMBRE DEL ASESOR:
DRA. RAQUEL RAMÍREZ AMADOR



Tzompantepec, Tlaxcala, 13/noviembre/2025

Oficio No. MM-712/2025

Asunto: Liberación de Proyecto para Titulación Integral.

LIC. CECILIA YARELLY ARREGUIN LARA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para Titulación integral:

Alumno (a):	ALBERTO PICHÓN MARTÍNEZ
Carrera:	INGENIERÍA MECATRÓNICA
No. De Control:	20370784
Nombre del Proyecto:	"CARACTERIZACIÓN DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO APLICADO A SEMICONDUCTORES".
Producto:	TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL.

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

MTRO. JORGE AGUILAR VÁZQUEZ
JEFE DEL DEPTO. DE METAL-MECÁNICA



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
**DEPARTAMENTO DE
METAL MECÁNICA**

DRA. RAQUEL RAMÍREZ AMADOR
ASESORA

c.p.- Archivo.
JAV*petry.



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec,
Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, Mex. C.P. 90491 Tel.
(241) 4172010 Ext. 124, e-mail: mecanica@apizaco.tecnm.mx
tecnm.mx | apizaco.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Apizaco
División de Estudios Profesionales

Tzompantepec, Tlaxcala, 27/Enero/2026

ALBERTO PICHÓN MARTÍNEZ
EGRESADO(A) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
CON NÚMERO DE CONTROL 20370784.
P R E S E N T E.

Por este medio, me permito informar a usted que por aprobación de la comisión revisora asignada para valorar el trabajo que mediante la opción **TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL** y cuyo tema es: **"CARACTERIZACIÓN DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO APLICADO A SEMICONDUCTORES"**, conforme a lo establecido en el procedimiento para la obtención del Título Profesional en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios Profesionales a mi cargo le otorga la:

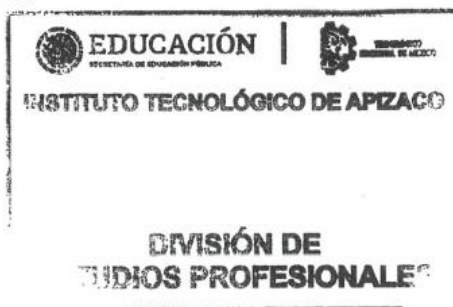
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar **1 USB** del mismo, apropiadamente empastados, a la brevedad, para presentar su Acto de Recepción Profesional.

Sin otro particular por el momento me despido.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

CECILIA YARELY ARREGUÍN LARA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



ccp. Archivo
CYAL/Gsc*



Agradecimientos

Primero que nada, quiero darle gracias a Dios por permitirme llegar a este momento tan importante de mi vida, dándome salud, fortaleza, bondad y abundancia en mi persona.

Quiero expresar este agradecimiento de todo corazón a cada uno de mis familiares que estuvieron durante mi formación académica, que son fundamentales de este pilar, ya que cada uno aportó su granito de arena para poder lograr esta grande meta.

Quiero darles las gracias de todo corazón este esfuerzo a mis padres Abundio Pichón y Lidia Martínez, le pido mucho a Dios que les dé mucha salud y trabajo, que sin ayuda de ustedes no haya sido posible lograr esta meta que tanto he anhelado. No fue fácil, ni imposible; hubo momentos de angustia, saturación, y momentos de abstinencia. Todo esto representa una huella imborrable en mi vida, reflejo del esfuerzo y apoyo de mis padres.

Gracias por todo este apoyo por su amor y cariño papas, y pido perdón a pesar de lo mal portado que a veces soy, me esforzaré, y daré todo lo mejor de mí para llegar a hacer un gran ingeniero mecatrónico, también lucharé para poder cumplir con mis otros sueños, de poder darles una mejor vida, poder tener mi propia casa, poder formar una familia, tener mi propio auto y de ser un futbolista. Nunca olvidaré de dónde vengo, mantendré siempre la humildad que me educaron y cada día buscaré ser una mejor persona.

Gracias papas por todo algún día la podré recompensar no de la misma manera, pero sí con uno que otro detalle que sea de corazón.

De igual manera quiero agradecerle a mi abuelita Margarita, una mujer llena de mucha sabiduría, que en cada momento me ha dejado una huella imborrable en mi corazón. Gracias por cuidarme desde niño y brindarme siempre motivación, comprensión, honestidad y entusiasmo para salir a delante y convertirme en una gran persona.

Solo le pido a Dios que te de mucha salud a usted y a toda mi familia, para poder seguir compartiendo más momentos hermosos juntos, gracias por todo abuelita la quiero mucho, daré lo mejor de mí en esta nueva etapa de mi vida.

A mis hermanos, quiero agradecerle a cada uno de ustedes por todos los momentos hermosos que hemos compartido desde la infancia, la adolescencia y ahora en nuestra juventud, cada muestra de apoyo y generosidad que me han brindado ha sido un respaldo incondicional, que sinceramente no he sabido comprender o agradecer del todo. Deseo de todo corazón que siempre mantengamos una buena comunicación, que no exista en algún futuro ninguna envidia entre nosotros.

Espero que cada uno pueda lograr sus metas, y que sepan que en lo poco o mucho siempre contarán con mi apoyo.

Todo lo que me han ofrecido hasta ahora no sé cómo pagarlo, pero algún día espero poder agradecerles y poder brindarles otros detalles gracias, hermanos.

Primero que nada, quiero agradecerle a cada uno de mis tíos por cuidarme, motivarme y brindarme todo su apoyo en este gran camino.

Sé que para algunos es simple un corte de cabello, pero para mí tiene un gran valor, porque me muestra su cariño y su generosidad.

Le pido a Dios que les de mucha salud y trabajo, para que podamos seguir compartiendo momentos juntos con toda la familia.

Se todo lo que me han aportado y aunque nunca poder pagarles completamente, me esforzaré siempre por devolverles con detalles, cariño y gratitud como lo han hecho conmigo, muchas gracias, tíos.

A mis compañeros y amigos Cesar, Geovanni, Fernanda, Jose Manuel, Víctor, Edwin y Raul, gracias por el compañerismo, las experiencias y los momentos compartidos durante estos cuatro años de carrera. Les deseo mucho éxito en esta nueva etapa y que logren cada una de sus metas. Gracias por su amistad.

Doctora Raquel, quiero agradecerle por la oportunidad y la confianza de realizar mi residencia profesional con usted.

Durante mi estancia universitaria tuve la certeza de poder tomar una clase con usted, sé que es una gran maestra, valiente, motivadora y siempre se encuentra impulsando a las personas que la rodean para dar lo mejor de sí mismo, el cual he sentido una confianza de aprender, equivocarme y crecer. No soy un gran alumno, pero cada día trato de mejorar y gracias doctora por todo este proceso.

De igual manera quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los profesores Alfredo Oscar y Raziell, quienes durante el desarrollo de este proyecto de residencias me brindaron guía, apoyo y valiosas sugerencias que fortalecieron de manera significativa la calidad de este proyecto. Admiro profundamente su vocación, dedicación y la forma en que, a pesar de cualquier circunstancia, siempre transmiten entusiasmo y motivación, son personas excepcionales y un ejemplo a seguir.

A mis compañeros de trabajo Erika, Geovanny y Luis Angel, agradezco el compañerismo, el apoyo y las aportaciones que realizaron durante este proceso. Aún que el tiempo de convivencia fue breve, lo valoro enormemente y me siento afortunado de haber compartido esta experiencia con ustedes. Deseo que nuestra amistad siga y que cada uno de ustedes encuentre el éxito en el nuevo camino que está por comenzar. Recordemos que, aun cuando nos encontremos en los momentos más oscuros, siempre existirá una salida, y dependerá de cada uno de nosotros si avanzar hacia ella.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecerme a mí mismo.

Me agradezco por no rendirme, por haber seguido adelante a pesar de los miedos y cualquier obstáculo, las dudas y los momentos difíciles. Me dedico este esfuerzo, este sacrificio y esta lucha que he recorrido con la guía de muchas personas, especialmente mi familia, y con los consejos que me han acompañado cada paso.

Sé que no fue fácil. Hubo momentos en los que pensé que no lo lograría, en los que sentí miedo, pero encontré la fuerza para continuar. Hoy estoy aquí; llegando a una hermosa etapa de mi vida: convertirme en Ingeniero en Mecatrónica.

Sé que esta etapa es la más dura de todas, pero a la vez la más bonita, espero que esté nueva etapa, esta llena de experiencias, crecimiento, un gran trabajo y el cumplimiento de sueños que tengo desde niño.

Este logro sé que no es solo mío, si no es de toda mi familia, y hoy más que nada me agradezco a mí mismo por haber llegado hasta aquí y si algún día no logro algunas de estas metas entonces haber fracasado.

Sé que me costó mucho y es por eso, que tengo dos personitas a quienes quiero enorgullecer y dos apellidos que dejar en alto.

Por muy difícil que sea el camino, nunca dejes de soñar: Alberto Pichón Martínez

Gracias.

Resumen

El presente proyecto tiene como propósito la caracterización térmica de un horno de fabricación casera aplicado a procesos de los semiconductores, mediante la implementación de un sistema de medición y monitoreo controlado por un microcontrolador Arduino. El sistema está conformado por termopares tipo K y el módulo MAX6675, encargado de convertir las señales analógicas de temperatura en los datos digitales, permitiendo la lectura precisa y estable. Además, en el software de Arduino IDE, posibilita la visualización y el control de la temperatura en tiempo real, asegurando la estabilidad del sistema térmico durante el proceso.

A partir de la caracterización obtenida, se realizará el cálculo teórico de un controlador PID, con el fin de analizar la respuesta térmica del sistema y determinar los parámetros necesarios para un control eficiente, sin llegar a su implementación práctica.

El programa implementado en Arduino permite monitorear continuamente la temperatura interna del horno, registrar el tiempo de respuesta y evaluar la capacidad del sistema para alcanzar y mantener la temperatura deseada. Este análisis se orienta a comprender el comportamiento térmico necesario para la modificación de las propiedades eléctricas de los materiales semiconductores, en procesos como la oxidación, la difusión y el recocido.

Este análisis proporciona información fundamental para evaluar el desempeño térmico del horno y optimizar las condiciones del tratamiento térmico, garantizando una mayor precisión y estabilidad en la operación. Este proyecto tiene aplicaciones relevantes en la manufactura de semiconductores, donde el control térmico preciso constituye un factor determinante en la calidad del producto final.

Índice

Agradecimientos	4
Resumen.....	7
Introducción.....	15
Capítulo I. Tecnológico Nacional de México (Campus Apizaco).....	16
1. Generalidades del instituto tecnológico de Apizaco	17
1.1 Reseña histórica del Instituto Tecnológico de Apizaco	17
1.2 Misión	17
1.3 Visión	17
1.4 Valores	17
1.5 Oferta Educativa.....	18
1.6 Ubicación del Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco	19
1.7 Política Integral de Administración Institucional Calidad, Medio ambiente y Seguridad y Salud en el Trabajo.....	20
1.8 Política de Igualdad Laboral y no Discriminación del Tecnológico Nacional de México.	20
1.9 Descripción del área de trabajo.....	20
1.10 Problemas a resolver	21
1.11 Objetivo general	21
1.12 Objetivos específicos	21
1.13 Justificación del proyecto	22
1.14 Limitaciones del proyecto.....	22
Capítulo II. Marco teórico.	24
2.1 Antecedentes históricos	25
2.2 Tipos de hornos para semiconductores.....	28
2.2.1 Horno de nitrógeno	28
2.2.2 Horno vertical y horizontal.....	29
2.2.3 Horno horizontal.....	29
2.2.4 Horno de difusión	30
2.2.5 Horno de mufla	31
2.2.6 Horno por inducción	31
2.3 Funcionamiento de un horno para semiconductores.....	32
2.4 Caracterización térmica del horno.....	33

2.5 Importancia del control térmico en los procesos de semiconductores	33
2.6 Procesos: recocido, difusión, oxidación, CVD.....	34
2.6.1 Proceso de recocido	34
2.6.2 Proceso de difusión.....	34
2.6.3 Proceso de oxidación.....	35
2.6.3.1 Proceso de oxidación en seco	36
2.6.3.2 Proceso de oxidación en húmedo.....	36
2.6.4 Proceso de CVD	36
2.7 Microcontrolador Arduino	37
2.8 Control térmico y cálculo teórico para un controlador PID	37
2.9 Termopar	38
2.9.1 Tipos de termopares	38
2.9.2 Termopar Tipo J (Hierro/Constantán)	38
2.9.3 Termopar Tipo E (Cromel/Constantán).....	39
2.9.4 Termopar Tipo S (Platino/Rodio de 10%):	39
2.9.5 Termopar tipo T:	40
2.9.6 Termopar Tipo K (Cromel/Alumen):.....	40
Capítulo III. Desarrollo de proyecto.....	43
3.1 Fase 1: Diseño	44
3.2 Fase 2: Tecnología y Herramientas Utilizadas	48
3.2.1 Tecnología.....	48
3.2.2 Herramientas	49
3.3 Fase 3: Desarrollo del Prototipo	53
3.3.1 Principio del funcionamiento	53
3.3.2 Simulación del circuito en software Proteus.....	58
3.3.3 Programa de Arduino	60
3.4 Montaje	64
Capítulo IV. Caracterización de horno.....	66
4.1 Caracterización	67
4.2 Caracterización experimental de calentamiento.....	67
4.3 Cálculo de parámetros dinámicos	72
4.4 Modelo de un sistema de control de segundo orden.....	76

4.5 Control PID.....	77
4.6 Diagrama a bloque lazo cerrado	79
Capítulo V. Resultados.....	83
5.1 Resultados	84
Capítulo VI. Conclusiones, Competencias Desarrolladas y Recomendaciones.....	87
6.1 Conclusión	88
6.2 Recomendaciones.....	89
6.3 Competencias desarrolladas.....	90
Capítulo VII. Referencias Bibliográficas.....	91
Referencias	92
Anexos	97
A) Caracterización del horno para tubo HT2-1100	97
B) Caracterización de horno grande.....	113
C) Costos	128

Índice de Figuras

Figura 1. Primeros hornos de fosa.-----	25
Figura 2. Germanio. -----	26
Figura 3. Horno Acheson. -----	26
Figura 4. Diodo. -----	26
Figura 5. Primer Transistor. -----	27
Figura 6. Horno de control automático. -----	27
Figura 7. Horno de procesamiento de semiconductores. -----	28
Figura 8. Horno tipo nitrógeno. -----	29
Figura 9. Horno vertical. -----	29
Figura 10. Horno horizontal. -----	30
Figura 11. Horno de difusión. -----	30
Figura 12. Horno mufla. -----	31
Figura 13. Horno por inducción. -----	32
Figura 14. Funcionamiento básico de horno para semiconductores. -----	33
Figura 15. Caracterización térmica. -----	33
Figura 16. Control térmico. -----	34
Figura 17. Proceso de recocido. -----	34
Figura 18. Proceso de difusión. -----	35
Figura 19. Procesos de oxidación. -----	35
Figura 20. Proceso de oxidación seco. -----	36
Figura 21. Proceso de oxidación húmeda. -----	36
Figura 22. Proceso CVD. -----	37
Figura 23. Microcontrolador Arduino uno. -----	37
Figura 24. Control Térmico. -----	38
Figura 25. Termopar tipo J. -----	39
Figura 26. Termopar tipo E. -----	39
Figura 27. Termopar tipo S. -----	40
Figura 28. Termopar tipo T. -----	40
Figura 29. Termopar tipo K. -----	41
Figura 30. Termocupla tipo K. -----	41
Figura 31. Perfil Principal del Software. -----	44
Figura 32. Diseño de medidas establecidas. -----	45
Figura 33. Pieza sólida. -----	45
Figura 34. Pieza sólida. -----	45
Figura 35. Diseño sólido terminado. -----	46
Figura 36. Diseño físico. -----	46
Figura 37. Vista frontal del horno. -----	47
Figura 38. Instalación de la biblioteca MAX6675. -----	49
Figura 39. Fibra de vidrio para horno. -----	49
Figura 40. Desarmador. -----	50
Figura 41. Caja de madera. -----	50

Figura 42. Arduino Uno. -----	50
Figura 43. Cable. -----	51
Figura 44. Termopar tipo K. -----	51
Figura 45. Resistencia eléctrica. -----	52
Figura 46. Módulo MAX 6675 pines. -----	52
Figura 47. Polaridad de termopar y Módulo MAX6675. -----	59
Figura 48. Simulación de circuito en software Proteus. -----	60
Figura 49. Simulación de 3 termopares. -----	62
Figura 50. Simulación de 3 termopares. -----	63
Figura 51. Dimmer. -----	67
Figura 52. Horno con dimmer. -----	67
Figura 53. Cámara termográfica. -----	72
Figura 54. Valores de sobre elongación máxima. -----	72
Figura 55. Valores de factor de amortiguamiento. -----	73
Figura 56. Valores de frecuencia natural amortiguada (ω_n). -----	73
Figura 57. Valores de frecuencia natural no amortiguada (ω_n). -----	74
Figura 58. Valores de sigma. -----	74
Figura 59. Valores de tiempo de asentamiento 2%. -----	75
Figura 60. Valores de tiempo de asentamiento 5%. -----	75
Figura 61. Interfaz de software Matlab. -----	79
Figura 62. Simulink. -----	80
Figura 63. Diagrama a bloque conectado. -----	80
Figura 64. Modificación de valores de bloque. -----	81
Figura 65. Diagrama a bloque. -----	82

Índice de Tablas

Tabla 1. Calibres para termopar tipo K.	42
Tabla 2. Explicación de conexionado de pines.	59
Tabla 3. Temperatura de 100 °C.	68
Tabla 4. Temperatura de 200 °C.	69
Tabla 5. Temperatura de 300 °C.	69
Tabla 6. Temperatura de 400 °C.	70
Tabla 7. Temperatura de 500 °C.	70
Tabla 8. Temperatura de 600 °C.	70
Tabla 9. Temperatura de 700 °C.	71
Tabla 10. Temperatura de 750 °C.	71
Tabla 11. Método Ziegler - Nichols.	77

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Tiempo de asentamiento de 2% y 5%.	76
Gráfica 2. Comparación de controladores P, PI y PID con datos experimentales del horno.	78
Gráfica 3. Controlador PID.	78

Introducción

Los hornos de tratamiento térmico constituyen un elemento fundamental en la industria de los semiconductores, ya que nos permiten ejecutar procesos críticos que modifican las propiedades físicas y químicas de los materiales, con el propósito de obtener las características requeridas para su correcto funcionamiento. Estos equipos están diseñados para operar condiciones extremas, alcanzando temperaturas que puedan superar los 1650 °C, el cual resulta esencial para procedimientos como el recocido, la oxidación, la difusión y la deposición química de vapor (CVD). Así mismo, garantizan un control preciso de la temperatura y un ambiente libre de contaminantes, factores determinantes para asegurar la calidad y el rendimiento de los dispositivos semiconductores.

En el presente proyecto se plantea la caracterización de un horno casero a semiconductores, por ende, un sistema de control térmico aplicado a un horno de tratamiento para semiconductores. El sistema se basa en la medición y estabilización de la temperatura dentro del tubo canalizado del horno, haciendo uso del microcontrolador Arduino, termopares tipo K y el módulo MAX6675, los cuales permiten obtener lecturas precisas y digitales de la temperatura interna. Este enfoque contribuye significativamente a la optimización de los procesos térmicos y a la reducción de fallas recurrentes, mejorando así la eficiencia y confiabilidad en la producción de semiconductores.

Además de esta caracterización del horno, nos permitirá hacer el cálculo de un controlador PID (Proporcional - Integral – Derivativo) con el fin de analizar una respuesta térmica y así tener un control estable y eficiente de la temperatura.

En el contexto industrial, los hornos de tratamiento térmico deben cumplir con estrictos estándares de precisión y estabilidad. Para ello, se utilizan tecnologías avanzadas como el calentamiento por inducción, que se genera por el campo electromagnéticos, capaces de inducir corrientes parasitas en los materiales, produciendo un calentamiento rápido y uniforme. A su vez, la automatización en el manejo de materiales y el diseño automatizado de los hornos contribuyen a mejorar la eficiencia del proceso y reducir los tiempos.

En conjunto, estas características convierten a los hornos de tratamiento térmico en herramientas indispensables para la fabricación de los semiconductores, así garantizando calidad, la consistencia y el desempeño final de los materiales procesados.

Capítulo I. Tecnológico Nacional de México (Campus Apizaco).

1. Generalidades del instituto tecnológico de Apizaco

1.1 Reseña histórica del Instituto Tecnológico de Apizaco

La historia de la sociedad tlaxcalteca ha sido marcada e impulsada por el trabajo, el compromiso y la visión de hombres y mujeres que con determinación y ahínco han buscado el desarrollo del estado.

Sin duda, personalidades de gran trascendencia como Don Emilio Sánchez Piedras, entonces Gobernador Constitucional, comprometido con la juventud del estado, contando con el apoyo decisivo del presidente de la República, el Lic. Luis Echeverría Álvarez, personaje visionario del futuro de la educación y de la juventud de esta región del país, gestiona y funda el Instituto Tecnológico Regional de Apizaco e inicia sus actividades el 1 de octubre del año de 1975.

El Tecnológico de Apizaco, desde hace más de cuatro décadas, se ha dedicado a propiciar alternativas reales y sustentables para la juventud de la región. Es una Institución que pertenece al Tecnológico Nacional de México, del cual formamos parte de 254 Tecnológicos distribuidos en los 32 estados del país.

El ITA ofrece actualmente en su formación educativa 12 Ingenierías, 3 Maestrías y un Doctorado, cuyas matrículas abarcan de manera integral una formación general básica que incluye el fortalecimiento científico y metodológico; todas las carreras cuentan con especialidades diseñadas para atender las necesidades de los sectores productivo y social. Los planes de estudio están basados en una estructura genérica, una especialidad y una residencia profesional (ITApizaco & Reseña, 2012).

1.2 Misión

Formar profesionistas que sean líderes visionarios, emprendedores, con capacidad de generar soluciones disruptivas, innovando en la ciencia y la tecnología, comprometidos con el desarrollo económico, responsabilidad social teniendo una visión sostenible y sustentable (ITApizaco & Visión, Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco, 2012).

1.3 Visión

Ser una Institución de educación superior tecnológica de vanguardia, formadora de ciudadanos del mundo, con conocimientos intercultural, respetando la diversidad social. (ITApizaco & Visión, Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco, 2012)

1.4 Valores

Honestidad: Se demuestra día a día a través de la transparencia con la ejecución de las actividades laborales cotidianas.

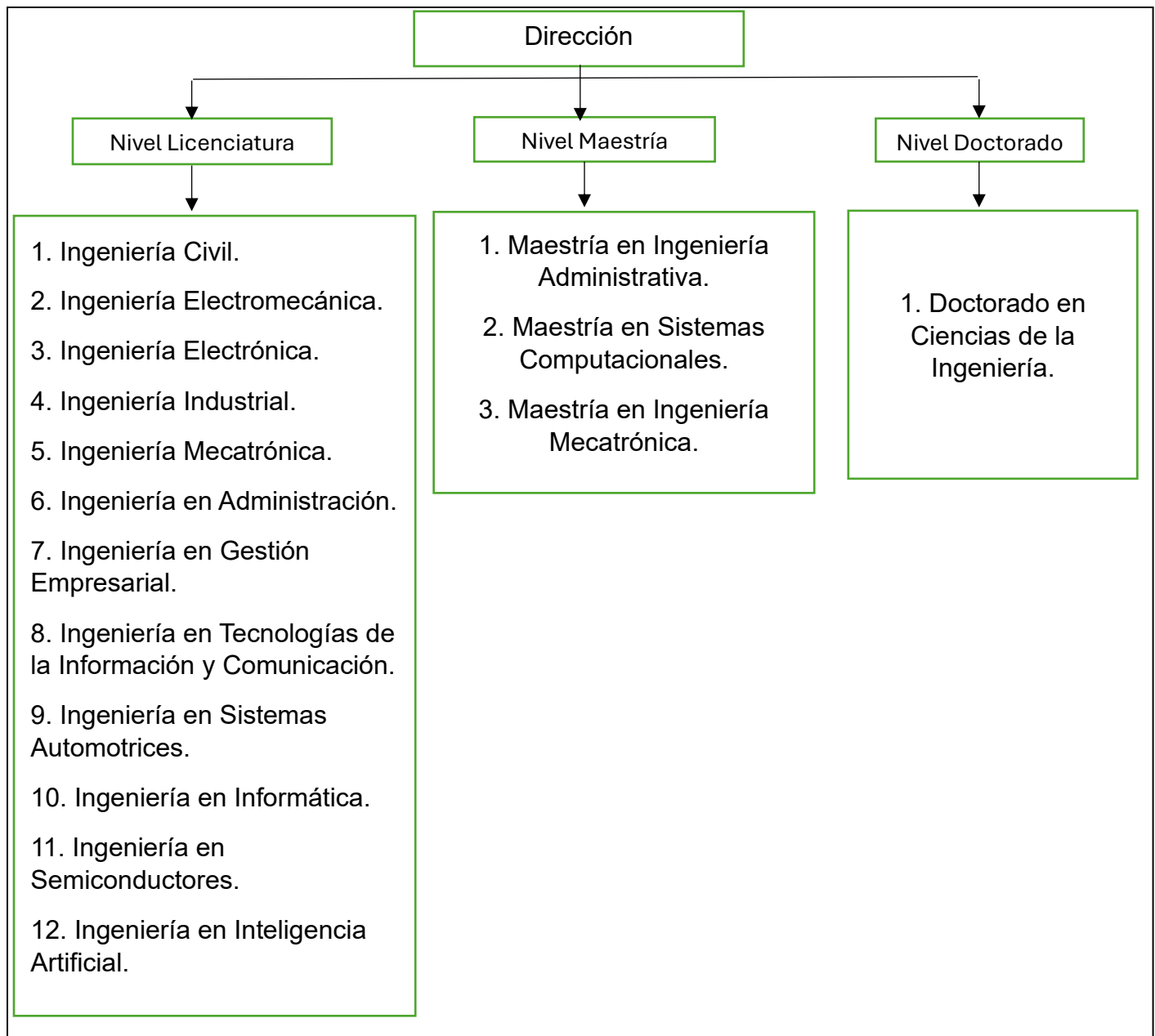
Responsabilidad: Es la actitud que caracteriza al personal en el cumplimiento de su tarea con eficacia y eficiencia en beneficio de la comunidad.

Lealtad: Es la actitud que caracteriza al personal del Instituto Tecnológico de Apizaco, aplica sus conocimientos y habilidades en el logro de las metas institucionales, sin olvidar en ningún momento el lema:

“Pensar para servir, servir para triunfar”

(ITApizaco & Visión, Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco, 2012)

1.5 Oferta Educativa



1.6 Ubicación del Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco

El instituto tecnológico de Apizaco se encuentra aproximadamente 25 minutos en auto de la capital del estado, Tlaxcala.

Se encuentra ubicado geográficamente en el municipio de San Andrés Ahuashuatepec, que pertenece al municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, México.

Su dirección Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec, Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, Mex. C.P. 90491.

En la ilustración 1, se podrá mostrar la vista de la ubicación del Instituto Tecnológico de Apizaco.

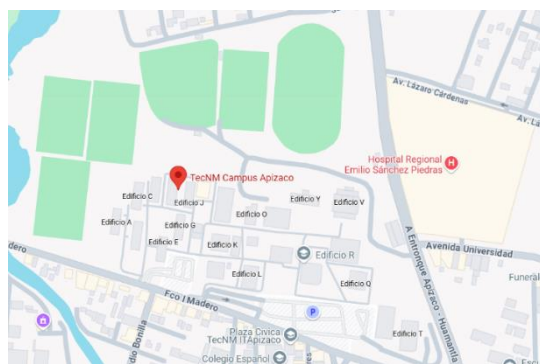


Ilustración 1: Vista de la Ubicación del Instituto Tecnológico de Apizaco.

Fuente de Google Maps

En la siguiente ilustración 2, se podrá ver la vista satelital del Instituto Tecnológico de Apizaco.



Ilustración 2: Vista Satelital del Instituto Tecnológico de Apizaco

Fuente de Google Maps

Como se muestra en la ilustración 2, podemos ver como referencia de ubicación del Instituto Tecnológico de Apizaco, que al lado derecho (este) del campus, se localiza el hospital regional Emilio Sánchez piedras.

Del otro lado izquierdo-sur (suroeste) del campus, se encuentra la escuela secundaria técnica No.9.

1.7 Política Integral de Administración Institucional Calidad, Medio ambiente y Seguridad y Salud en el Trabajo.

El Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Apizaco, establece el compromiso de implementar y orientar todos sus procesos estratégicos y actividades hacia la calidad del servicio educativo, respeto del medio ambiente, seguridad y salud de las personas dando cumplimiento a los requisitos del estudiantado y partes interesadas, legislación aplicable y otros requisitos que se describan. (ITApizaco & INSTITUCIONAL, Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco, 2012)

1.8 Política de Igualdad Laboral y no Discriminación del Tecnológico Nacional de México.

El Tecnológico Nacional de México a través de su Director General, manifiesta su compromiso con la defensa de los derechos humanos, por lo que en la esfera de su competencia garantizará el principio de igualdad sustantiva entre mujeres y hombres en el ejercicio de sus derechos laborales, así como el derecho fundamental a la no discriminación en los procesos de ingreso, formación y promoción profesional, además de sus condiciones de trabajo, quedando prohibido el maltrato, violencia y segregación de las autoridades hacia el personal y entre el personal en materia de cualquier forma de distinción. (ITApizaco, POLÍTICA DE IGUALDAD LABORAL Y NO DISCRIMINACIÓN, 2012)

1.9 Descripción del área de trabajo

Para nuestra área de desarrollo de este proyecto corresponde al edificio de ingeniería eléctrica – electrónica, los cual se encuentra conformado de las siguientes actividades a desarrollar:

- Investigación del proyecto: Para está actividad, debemos de tener la información necesaria para poder guiarnos, como su forma de funcionamiento, material, diagramas y así poder desarrollar adecuadamente el proyecto.
- Selección de material: En este proceso debemos de tener la lista del material necesario a utilizar para ver qué tipo de material debe ser el adecuado, para que lo podamos utilizar y sea de eficiencia al prototipo.

- Simulación del circuito: En esta actividad, una vez terminando la anterior actividad de nuestra lista de materiales a utilizar, debemos de usar una aplicación para poder simular nuestro circuito.
- Construcción del proyecto: Una vez hecho la anterior actividad de la simulación de nuestro circuito, de este modo por medio del diagrama electrónicos y eléctricos para realizar las conexiones de los diferentes dispositivos.
- Pruebas del proyecto: Teniendo la construcción de nuestro proyecto, se llevarán a cabo las pruebas, por el cual podemos verificar si existe alguna falla, algo se encuentra mal conectado, debemos de cambiarlo o algún componente se encuentra en un estado defectuoso.
- Análisis del resultado: En esta actividad debemos de supervisar nuestro prototipo, si se encuentra en óptimas condiciones, no debe haber algún cable suelto, si es que no, debemos colocarlo a la posición final, para que finalmente todo el circuito, se encuentre muy bien conectado.
- Redacción del proyecto: Teniendo todos nuestros puntos anteriores, se procederá de manera digital la redacción de conforme se fue desarrollando, así obteniendo los diagramas, evidencia del proceso que se llevó a cabo del montaje.

1.10 Problemas a resolver

Poder obtener la caracterización de temperatura de nuestro horno para semiconductores, para así evitar daños a los semiconductores y tenga un balance efectivo de temperatura.

Debemos tener en cuenta lo siguiente:

- 1- Control de temperatura: Obtener lectura de la temperatura en tiempo real por medio de los termopares, así para tener un control preciso y poder llevar a cabo un buen control.
- 2- Tiempo de asentamiento: Tomar el tiempo de subida máxima de la temperatura y poder verificar, en que tiempo tarda en estabilizarse.

1.11 Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de control PID horno de tratamiento, aplicado en los procesos de fabricación de semiconductores, a partir de los resultados obtenidos de de la caracterización de este para tener un control eficiente.

1.12 Objetivos específicos

- Determinar la temperatura a lo largo del proceso de tratamiento, el cual como la temperatura varia durante el ciclo de tratamiento térmico y verificar si el horno mantiene un perfil térmico constante en todo proceso.

- Verificar que capacidad del horno puede alcanzar y mantener temperaturas requeridas, examinar la capacidad del horno para cumplir con las especificaciones térmicas necesarias para el tratamiento adecuado de semiconductores en cuanto a temperatura y tiempo.
- Implementar un sistema de monitoreo de temperatura, basado en Arduino, donde nos permita registrar el comportamiento térmico en el tubo y verificar la eficiencia del horno.
- Evaluar el sistema de control PID mediante el método de Ziegler–Nichols para un sistema de segundo orden, determinando su función de transferencia en lazo cerrado y evaluando los parámetros de desempeño a través de simulaciones en Python.

1.13 Justificación del proyecto

El tratamiento térmico es un proceso crucial en la fabricación de semiconductores, ya que influye directamente en las propiedades eléctricas y estructurales de los materiales semiconductores. Un control preciso de la temperatura y la uniformidad térmica durante este proceso es esencial para garantizar la calidad y el rendimiento de los dispositivos semiconductores finales. Sin embargo, a pesar de la importancia del tratamiento térmico, muchos hornos utilizados en este proceso presentan desafíos en términos de control térmico, distribución de temperatura y estabilidad a lo largo del ciclo de tratamiento. Por ende, unas de las razones pueden ser:

- Optimizar el proceso de semiconductores, ya que la caracterización detallada del horno permitirá identificar posibles ineficiencias en la distribución de la temperatura, lo que podría generar variaciones en las propiedades del material tratado.
- Mejorar la calidad y rendimiento de los semiconductores, ya que el tratamiento térmico adecuado es fundamental para el desarrollo de la caracterización del horno que permite evaluar si el equipo está logrando las condiciones térmicas necesarias para obtener las propiedades deseadas en los semiconductores, como la conductividad eléctrica, la resistencia térmica y las características de dopaje.

1.14 Limitaciones del proyecto

- Instrumentación avanzada

El equipo necesario para realizar mediciones precisas, como termopares de alta calidad, cámaras termográficas, o sistemas de control avanzados, puede no estar disponible.

- Acceso limitado a hornos especializados

Esto puede limitar la capacidad para realizar pruebas y obtener datos precisos sobre el proceso térmico.

- Simuladores de alta gama

Si es necesario realizar simulaciones detalladas del comportamiento térmico, el software especializado no contable.

- Tiempo para análisis y optimización

La recopilación de datos y su posterior análisis para hacer ajustes en el sistema puede ser un proceso largo, y el tiempo disponible puede no ser suficiente para realizarlo.

- Muestras limitadas de semiconductores

Para evaluar el impacto del tratamiento térmico sobre los semiconductores.

- Modelos de simulación limitados

La capacidad para desarrollar modelos de simulación precisos sobre el comportamiento térmico dentro del horno podría verse limitada por la falta de software de simulación avanzado.

- Presupuesto

No contar con recurso necesario.

Capítulo II. Marco teórico.

2.1 Antecedentes históricos

La historia de los hornos de tratamiento térmico para semiconductores se remonta a partir del término semiconductor que se introdujo en el siglo XVIII, marcando el inicio de una trayectoria llena de descubrimientos y avances tecnológicos. Para poder comprender la evolución de estos equipos, es necesario realizar un recorrido histórico que nos remonta a los primeros hornos construidos por el ser humano, hacia el año 8000 a. C., tal como se ilustra en la figura 1, los hornos iniciales eran de tipo fosa, es decir, simples cavidades excavadas en la tierra en las que se colocaban las piezas a tratar. Posteriormente, estas se cubrían y rodeaban con material (Bernardo, Ricardo, & Cunha, 2014).



Figura 1. Primeros hornos de fosa.

Nota. Tomado por National Geographic.

(https://historia.nationalgeographic.com.es/a/que-revela-horno-cal-epoca-romana-descubierto-inglaterra_23610).

La evolución de los hornos de tratamiento térmico ha estado acompañado al desarrollo de la ciencia de los materiales y en el campo de la electrónica. El término semiconductor se remonta en el siglo XVIII y marco el inicio de una nueva era tecnológica en el ámbito de la electrónica moderna (Shanon, 2025).

En el año de 1883, Michael Faraday descubrió que la resistencia del sulfuro de plata disminuía al aumentar la temperatura, sentando las bases del efecto semiconductor (Catarina P, Marques, De melo, & Torres, 2024). Para el año de 1886, en la figura 2 se observa, Clemens Winkler descubrió el germanio y Willoughby Smith el selenio (1876), ambos materiales son fundamentales en la historia de la electrónica (Malviya, Patidar, Gupta, & Mittal, 2016).



Figura 2. Germanio.

Nota. Tomado por Polycrystalline-germanium.

(<https://es.wikipedia.org/wiki/Germanio#/media/Archivo:Polycrystalline-germanium.jpg>).

En 1893, Edward Acheson desarrolló el horno Acheson la siguiente figura 3 presenta, utilizado para producir carburo de silicio, precursor para materiales semiconductores de alta temperatura (Guichelaar, 1933).

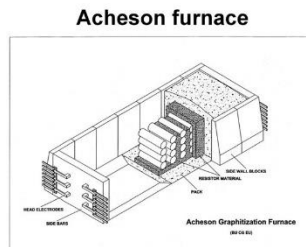


Figura 3. Horno Acheson.

Nota. Tomado por karssenmetal.

(<https://www.karssenmetal.com/acheson-graphitization-furnace-n.html>).

En el año de 1904 el físico e ingeniero eléctrico británico John Ambrose Fleming, basándose en el efecto Edison, desarrolló el dispositivo electrónico más simple conocido como el diodo que se puede mostrar en la figura 4, dicho diodo cuenta con una polaridad la cual el ánodo (positivo) y el cátodo (negativo), los diodos se encuentran principalmente hechos de material de silicio y germanio, y son de tipo P (con exceso de huecos) y tipo N (exceso de electrones) (Martil, Sin fecha).

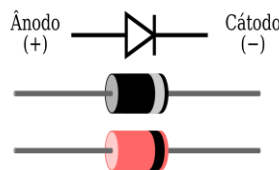


Figura 4. Diodo.

Nota. Tomado por electrónica digital.

(https://jessicacardenaselectronicadigitalsl.blogspot.com/p/diodo-semiconductor_20.html).

Años más adelante, en 1947, John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley, en la figura 5, muestra la construcción del primer transistor de germanio, lo que marco el inicio de la electrónica moderna (Ramos, 2012).



Figura 5. Primer Transistor.

Nota. Tomado por Museo de la telecomunicación.
(<https://museotelecomvlc.webs.upv.es/el-transistor/>).

En la figura 6 se observa, estos avances impulsaron la creación de hornos automáticos programables, capaces de ejecutar programas de cocción sin intervención humana, dando paso a los sistemas de control térmico automatizado que hoy en día se utilizan en la industria de los semiconductores (Hernández, 2007).



Figura 6. Horno de control automático.

Nota. Tomado por Kindle.
(<https://es.kindle-tech.com/articles/how-to-choose-right-muffle-furnace-for-your-laboratory>).

Después de la creación del horno automático, el avance del descubrimiento de los materiales conductores como silicio y germanio se empezaban a crear más circuitos avanzados de semiconductores, en la figura 7 muestra, el horno de procesamiento semiconductor. En la parte inferior se encuentra el calentador que permite elevar la temperatura del horno a un nivel específico necesario para la fabricación de los semiconductores, sobre el calentador se encuentra una plancha destinada para la colocación de piezas, y debajo se está se localizan las herramientas. Afuera del horno se encuentra la bomba, dicha bomba generalmente bomba de vacío, es fundamental para crear un ambiente de baja presión necesario para diversos procesos de fabricación. Arriba de la bomba se puede observar el un manómetro de capacitancia que, sirve para medir con precisión la presión, específicamente en vacío, durante los procesos de

fabricación de semiconductores (Haeting Up Innovation in the Semiconductor Processing Furnace Market, 2025).

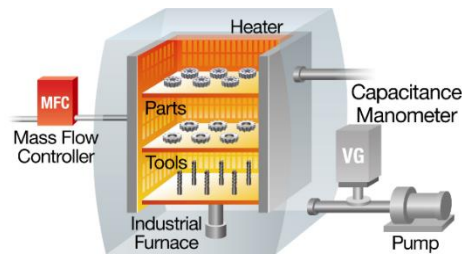


Figura 7. Horno de procesamiento de semiconductores.

Nota. Tomado por semiconductores.

(<https://www.google.com/search?q=semiconductores+ho>).

2.2 Tipos de hornos para semiconductores

Existen diferentes tipos de hornos para la fabricación de semiconductores, uno de ellos son el de difusión, vertical, horizontal, mufla, inducción y nitrógeno.

2.2.1 Horno de nitrógeno

Este tipo de horno es utilizado principalmente para el horneado, curado, recocido, y es utilizado por gas nitrógeno para crear un entorno libre. Este es muy importante para los procesos sensibles a la oxidación, la humedad o la contaminación. La figura 8 muestra, que el horno se encuentra equipado con un sistema de suministro de gas nitrógeno que purga continuamente la cámara con nitrógeno, desplazando el aire y creando una atmósfera inerte. Los controles de temperatura permiten a los usuarios ajustar con precisión las condiciones de calentamiento, mientras que el flujo de nitrógeno garantiza que el ambiente permanezca libre de oxígeno y humedad durante todo el proceso. Es ideal para procesos de atmosferas controladas para evitar contaminación (¿Qué es un horno de Nitrógeno? Esencial Para Procesos, 2024).



Figura 8. Horno tipo nitrógeno.

Nota. Tomado por tecficbio.

(<http://www.teficbio.com/high-temperature-muffle-furnace/vacuum-atmosphere-muffle-furnace/lab-nitrogen-argon-atmosphere-muffle-furnace.html>).

2.2.2 Horno vertical y horizontal

En la figura 9, se presenta el horno de calentamiento de forma verticalmente está diseñado para procesar obleas de semiconductores en una disposición vertical, lo que viene permitiendo un flujo eficiente y uniforme de calor. Nos permite tener una mejor uniformidad térmica, menor riesgo de contaminación, ideal para procesos sensibles como oxidación, difusión y recocido. La forma vertical del horno nos permite una mejor transferencia de calor mediante la convección, así poder lograr una mejor distribución uniforme de la temperatura (GmbH, s.f.).



Figura 9. Horno vertical.

Nota. Tomado por crystec.

(<https://www.crystec.com/kllsicz.htm>).

2.2.3 Horno horizontal

En la figura 10, se habla de un horno donde la cámara de calentamiento será orientada de manera horizontalmente. Las obleas se colocan de manera horizontal, donde el calor se transfiere por la radiación. En este horno la transferencia de calor depende más de la radiación que de la convección, lo que puede provocar variaciones térmicas. A diferencia

del otro horno, es que este es más sencillo y económico, es adecuado para aplicaciones menos críticas, menor uniformidad térmica, menos uniforme y mayor riesgo de contaminación (GmbH, s.f.).



Figura 10. Horno horizontal.

Nota. Tomado por semiconductores.

(https://www.google.com/search?q=horno+horizontal+semiconductores&sc_esv=c08d791348b2aa9d&rlz=1C1AVFC_enMX1104MX1104&udm=2&biw=).

2.2.4 Horno de difusión

La figura 11 muestra, el horno de difusión utilizado principalmente para la inducción de dopantes en obleas de silicio mediante la incorporación de impurezas, creando dispositivos electrónicos a través de la fusión térmica a temperaturas que pueden alcanzar hasta 1400 °C. en la cámara del horno se introducen los gases dopantes, como el fósforo o arsénico, entre otros. A continuación, durante el proceso de difusión, los átomos del dopante se desplazan dentro de la oblea a altas temperaturas, modificando su estructura electrónica y formando zonas con diferentes características (GmbH, KLLCOMPZ - Crystal Lock Components, s.f.).

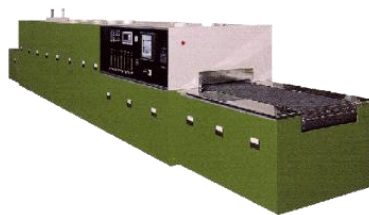


Figura 11. Horno de difusión.

Nota. Tomado por crystec.

(https://www.google.com/search?q=horno+de+difusion+semiconductores&sc_esv=c08d791348b2aa9d&rlz=1C1AVFC_enMX1104MX1104&udm=2&biw=).

2.2.5 Horno de mufla

En la figura 12, se muestra este tipo de horno de mufla, diseñado para alcanzar altas temperaturas y proporcionar un calentamiento uniforme en un ambiente controlado, donde se colocan las muestras o materiales a calentar. Su funcionamiento de este horno que, con ayuda de una resistencia eléctrica ubicada en el interior del horno, se calienta en la cámara interna y el calor se empieza a transferir principalmente por la conducción y radiación, manteniendo una temperatura muy uniforme. Se puede controlar la temperatura y el tiempo de calentamiento, lo que es fundamental para los procesos delicados en la fabricación. Estos hornos son utilizados para tratamientos térmicos como el recocido, secado, sinterización y oxidación de los semiconductores (Monteros, 2015).



Figura 12. Horno mufla.

Nota. Tomado por nabertherm.

(<https://nabertherm.com/es/productos/labor/hornos-de-mufla/hornos-de-mufla-hasta-1100-degc-o-1200-degc>).

2.2.6 Horno por inducción

En la figura 13 se muestra, este tipo de horno por inducción es una máquina eléctricamente que utiliza la inducción electromagnética para generar calor. Dentro del material conductor colocado en el interior del sistema, se inducen corrientes eléctricas mediante un campo magnético alterno generado por una bobina de cobre que rodea la carga. Su funcionamiento consiste en que la corriente alterna circula a través de la bobina, generando un campo magnético variable que, a su vez, induce corrientes eléctricas en el material conductor. Estas corrientes al circular por la resistencia eléctrica del material generan calor por defecto joule, así calentando el material de una manera rápida. Este tipo de hornos nos fluye una alta eficiencia energética de calentamiento que nos brinda es muy rápido y controlable (Bastidas, 1985).

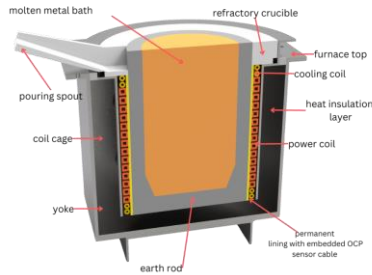


Figura 13. Horno por inducción.

Nota. Tomado por electroheatinduction.

(<https://electroheatinduction.com.mx/que-es-un-horno-de-induccion/>).

2.3 Funcionamiento de un horno para semiconductores

El funcionamiento básico de este horno para semiconductores es el siguiente:

En la figura 14 se muestra, el horno puede ser de tipo vertical o horizontal, estos hornos son diseñados para alcanzar y mantener temperaturas precisas, pueden alcanzar hasta los 1300°C. Dentro del proceso, las piezas de silicio se colocan dentro de un barco, tubo o soporte en interior del horno. El horno puede funcionar en atmósfera controlada (aire, gases o con bombas de vacío) para así evitar contaminaciones y permitir procesos específicos. En la zona de calentamiento como se observa en la figura 19, en la parte de en medio que se encuentra entreabierta, en esa parte se usan las resistencias eléctricas alrededor del tubo de cuarzo, estas resistencias calientan la cámara por la radiación (Tempress, 2004). En la zona de proceso, dentro del tubo se introducen las obleas, donde se inyectan gases de procesos estos gases pueden ser los siguientes:

Oxidación: H₂O vapor de agua.

Difusión: Mezcla de N₂ con PH₃.

Recocido: N₂, Ar.

En la parte de abajo del horno de la figura 19, se encuentra la zona de control, se puede observar por medio de un ordenador mandando la señal de los sensores al software, y así verificar la temperatura actual que se encuentra el horno (Tempress, 2004).

Una vez puesto las obleas en el tubo de cuarzo y teniendo el control de la temperatura requerida para el semiconductor, sería el fin de este proceso del horno en los semiconductores.



Figura 14. Funcionamiento básico de horno para semiconductores.

Nota. Tomado por icb.

(https://icb.mx/hornos/?srsltid=AfmBOoqwl2P6GLmKJ8K5bEfNdhSQpH_4m6STxDp_cKqLeG82rAdYwExj).

2.4 Caracterización térmica del horno

Puesto a una caracterización térmica es aquella que consiste en analizar el comportamiento de la temperatura dentro del horno, la siguiente figura 15 presenta, podemos observar que esta caracterización nos ayuda a identificar su estabilidad, distribución y capacidad de respuesta ante las variaciones que se le presenta. Gracias a esta caracterización nos permite determinar la eficiencia del sistema y evaluar su capacidad de control. Para la caracterización se emplean sensores, por lo regular son los termopares, ya que son los encargados de registrar los cambios de temperatura del horno (Hernández R. H., 2001).

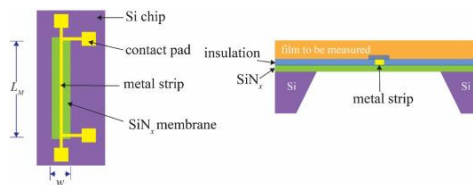


Figura 15. Caracterización térmica.

Nota. Tomado por Kindle.

(<https://es.kindle-tech.com/faqs/how-heat-is-generated-in-induction-furnace>).

2.5 Importancia del control térmico en los procesos de semiconductores

En la figura 16, podemos ver el control térmico para un horno, este horno es para semiconductores es un sistema avanzado y de alta precisión que regula la temperatura para la fabricación de componentes electrónicos (Ocampo, Iván, Alducin, & Molinar, 2023). Como se observa en la figura 16, permite a los operadores programar perfiles de temperatura complejos, con etapas de calentamiento, mantenimiento, además de

registrar los datos del proceso. Se observa en la figura 16 el controlador PID, el cual es el control de retroalimentación que ajustan automáticamente la potencia de los elementos calefactores para mantener la temperatura en el punto deseado, corrigiendo cualquier desviación. Dentro del horno se encuentran los elementos calefactores, estos resisten altas temperaturas y proporcionan un calentamiento uniforme para garantizar una distribución homogénea del calor en toda la cámara del horno (Balderas, 2007).

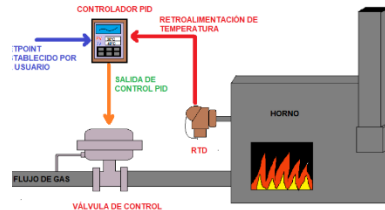


Figura 16. Control térmico.

Nota. Tomado por National Geographic.

(https://historia.nationalgeographic.com.es/a/que-revela-horno-cal-epoca-romana-descubierto-inglaterra_23610).

2.6 Procesos: recocido, difusión, oxidación, CVD.

2.6.1 Proceso de recocido

En la figura 17, se muestra el proceso de recocido en semiconductores es un proceso de tratamiento térmico que consiste en calentar el material a altas temperatura alrededor de los 600 °C y luego enfriarlo lentamente para restaurar su estructura y eliminar defectos como las dislocaciones. Por lo que se requiere de mejorar las propiedades eléctricas del material, por lo que resulta en una mayor eficiencia, menor dureza y mayor conductividad eléctrica (Semicorex, 2024).

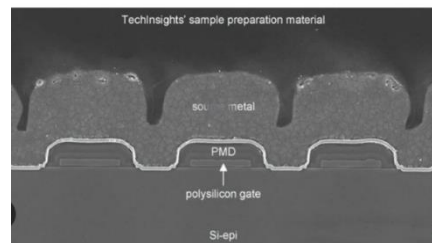


Figura 17. Proceso de recocido.

Nota. Tomado por semicorex.

(<https://es.semicorex.com/news-show-8352.html>).

2.6.2 Proceso de difusión

En la figura 18 se muestra, el proceso de difusión en los semiconductores es el movimiento natural de partículas como (átomos dopantes, impurezas y aportadores de

carga como electrones) de una región de alta concentración a una baja concentración para lograr el equilibrio. Por lo que en este mecanismo es fundamental para la fabricación de dispositivos electrónicos y para el transporte de corriente eléctrica. Movimiento de átomo: en este proceso de difusión se usa para introducir átomos dopantes en un semiconductor, alterando así sus propiedades eléctricas. Movimiento de portadores: durante la operación de un dispositivo, la diferencia en la concentración de electrones o huecos entre dos regiones crea una corriente de difusión. Los electrones se mueven de las zonas con alta densidad a las zonas con baja densidad hasta que la concentración se iguala. Este movimiento tiende hacer que la concentración de portadores sea más uniforme en todo el material (Clemente).

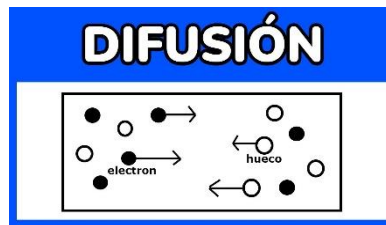


Figura 18. Proceso de difusión.

Nota. Tomado por slideshare.

(<https://es.slideshare.net/slideshow/difusin-y-efusin-de-gases/37213692>).

2.6.3 Proceso de oxidación

En la figura 19 se muestra, el proceso de oxidación en semiconductores es una reacción química que crea una fina capa de dióxido de silicio sobre la superficie de una oblea de silicio mediante su calentamiento en el horno de altas temperaturas. Esta capa de óxido actúa como aislante eléctrico y protege el sustrato de silicio (Novelli, 2023).

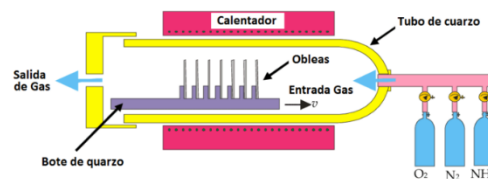


Figura 19. Procesos de oxidación.

Nota. Tomado por semicorex.

(<https://es.semicorex.com/news-show-1587.html>).

2.6.3.1 Proceso de oxidación en seco

En este proceso de oxidación en la figura 20 se observa, es un método de alta temperatura utilizado en la fabricación de semiconductores para hacer crecer una capa delgada, densa y alta calidad del dióxido del silicio en la superficie de la oblea de silicio. En la velocidad su crecimiento de la capa de oxido es lento, lo que permite un control muy preciso del espesor de la capa (Hernández C. F., 2008).

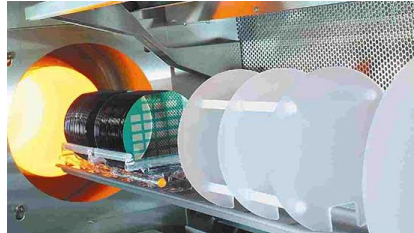


Figura 20. Proceso de oxidación seco.

Nota. Tomado por adobe.

(<https://indd.adobe.com/view/fe6b47b4-da89-43c7-8567-632ca4594892>).

2.6.3.2 Proceso de oxidación en húmedo

En la figura 21, se muestra el proceso de oxidación de manera húmeda de los semiconductores, que utiliza para hacer crecer una capa de dióxido de silicio sobre una oblea de silicio, empleando vapor de agua, como agente oxidante en un ambiente de alta temperatura. En comparación de la oxidación seca, la velocidad de crecimiento es rápido, ya que el vapor del agua tiene una mayor solubilidad y una tasa de difusión más rápida en el dióxido de silicio, lo que acelera la reacción y permite crear capas de oxido más gruesas en menos tiempo (Semicorex Advanced Material Technology Co., 2024).



Figura 21. Proceso de oxidación húmeda.

Nota. Tomado por semicorex.

(<https://es.semicorex.com/news-show-5685.html>).

2.6.4 Proceso de CVD

En la figura 22, se observa el proceso de CVD en el área de los semiconductores es un método para crear películas delgadas de materiales como sulfuros y seleniuros metálicos a partir de una solución química. El proceso implica sumergir un sustrato en un baño

acuoso que contiene precursores químicos, los cuales reaccionan y se depositan gradualmente en el sustrato, formando la película del semiconductor. Este método opera de manera en bajas temperaturas, por lo que lo hace ideal para sustratos sensibles al calor (Kindle., 2025).

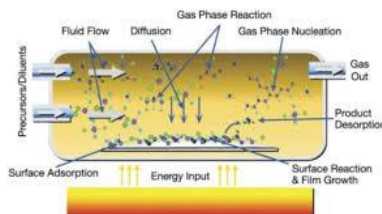


Figura 22. Proceso CVD.

Nota. Tomado por semicorex.

(<https://es.semicorex.com/news-show-1587.html>).

2.7 Microcontrolador Arduino

En la figura 23 se muestra, el microcontrolador Arduino, es una tarjeta electrónica programable que permite la creación rápida de prototipos. Su diseño es de código abierto (open-source). Esta plataforma permite crear diferentes tipos de microordenadores de una sola placa a los que la comunidad de creadores puede darles diferentes usos que sean necesarios. actúa como el centro de control del sistema de monitoreo, que recibe los datos los procesa y los muestra en tiempo real mediante el monitor serial del entorno de desarrollo Arduino IDE. Este sistema nos permite observar el comportamiento térmico y analizar la estabilidad del horno durante su operación (Torrente, 2013).

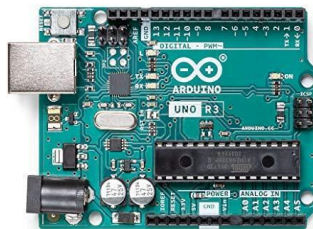


Figura 23. Microcontrolador Arduino uno.

Nota. Tomado por geekfactory.

(<https://www.geekfactory.mx/producto/arduino-uno-r3/?srsltid=AfmBOopvw0UnH9Nkr4PyCJLtbW4BTxHHmKhtZYy1Thz44JP028u7QRm>

—\

2.8 Control térmico y cálculo teórico para un controlador PID

Un control térmico es fundamental para garantizar calidad al tratamiento. En la figura 24 se muestra, un controlador tipo PID es un sistema ampliamente utilizado en la automatización de procesos térmico. Lo que hace es que su función sea mantener la temperatura deseada ajustando la potencia de los elementos (Alviz, 2022).

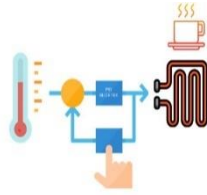


Figura 24. Control Térmico.

Nota. Tomado por electroheatinduction.

(<https://electroheatinduction.com.mx/principios-hornos-de-tratamiento-termico/>).

2.9 Termopar

Un termopar es un sensor para medir temperatura de baja, media y alta, el termopar puede consistir en dos metales diferentes unidos por un extremo. Son basados en efectos termoeléctricos, lo que le permite medir temperaturas superiores a los 2 000 °C e inferiores a los -250 °C, dependiendo los materiales con los que se fabrique. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, que se encuentran en forma de cable y están unidos en uno de sus extremos y separados por el otro. Los termopares son usados ampliamente en todas las industrias, desde la, aeroespacial, militar, producción de energía, fabricación de metales, ciencias médicas y fabricación de semiconductores. Cuenta con tipos de conector estándar, lo que los hace intercambiables y fáciles de obtener (Rayo, 2001).

2.9.1 Tipos de termopares

Existen diferentes tipos de termopares entre ellos los más utilizados son los siguientes:

2.9.2 Termopar Tipo J (Hierro/Constantán)

En la figura 25, se muestra, el termopar tipo J, es el tipo de termopar de mayor uso por su amplio rango de medición va aproximadamente desde los -40 °C hasta los 750 °C y bajo costo. Su composición está formada de los siguientes dos metales:

Elemento positivo: Hierro.

Elemento negativo: Constantán Cobre 55%, Níquel 45%.

Magnéticamente el termopar es sensible en su elemento positivo de Hierro.

La norma ANSI en su código de colores para termopares identifica al termopar tipo J con un aislamiento parcial de color rojo para el elemento negativo y un aislamiento blanco para el positivo (CEIV, 2025).



Figura 25. Termopar tipo J.

Nota. Tomado por ceiv.
(<https://ceiv.com.mx/termocupla-tipo-j/>).

2.9.3 Termopar Tipo E (Cromel/Constantán)

En la figura 26, se muestra el termopar tipo E, es un sensor de temperatura que utiliza la unión de dos metales diferentes para medir la temperatura. Es ideal para aplicaciones industriales y científicas que requieren una medición precisa y estable en un rango de temperatura amplio va aproximadamente desde -40°C hasta 750°C . Este sensor de temperatura tipo E está basado en las aleaciones Cromel – Constantán, pero ahora se mencionará exactamente sus elementos que lo conforman:

Elemento positivo: 90% Cromo- 10% Níquel (comercialmente llamado Cromel).

Elemento negativo: 95% Níquel, 2% Aluminio, 1% Silicón (comercialmente llamado Constantán) (Tc Medida y Control de Temperatura, 2025).

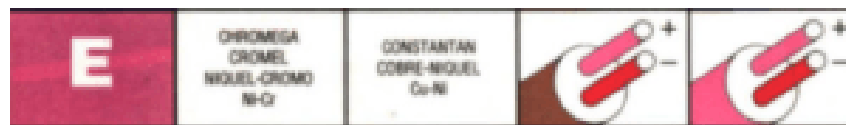


Figura 26. Termopar tipo E.

Nota. Tomado por tecnovoltio.
(<https://tecnovoltio.mx/tecnovoltio-termopar-tipo-j-k-y-mas/>).

2.9.4 Termopar Tipo S (Platino/Rodio de 10%):

En la figura 27, se observa el termopar tipo S, es el sensor de temperatura comercial de uso más frecuente para medición de temperaturas superiores a 1250°C . Su composición está formada de los siguientes dos metales (TC Medida y Control de Temperatura, 2025):

Elemento positivo: 70% Platino, 30% Rodio.

Elemento negativo: 94% Platino, 6% Rodio.



Figura 27. Termopar tipo S.

Nota. Tomado por termopravel.

(<https://www.termopravel.mx/producto/termopar-tipo-s/>).

2.9.5 Termopar tipo T:

En la figura 28 se muestra el termopar tipo T, el cual es un sensor de temperatura ampliamente utilizado en la instrumentación de sistemas de baja temperatura. Su rango operativo abarca desde aproximadamente de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, manteniendo una excelente estabilidad y precisión a lo largo de todo el intervalo.

La composición de los elementos de un termopar tipo T consta de una aleación Níquel – Cromo y Níquel – Aluminio – Magnesio – Silicio.

Los elementos que componen un termopar tipo T son:

Elemento positivo: Cobre 100%.

Elemento negativo: 55% Cobre – 45% Níquel (Constantán).



Figura 28. Termopar tipo T.

Nota. Tomado por ceiv.

(<https://ceiv.com.mx/termopar-tipo-t/>).

Cuando el elemento de Cobre Constantán cuenta con aislamiento de óxido de magnesio el termopar tipo T con sonda de Acero Inoxidable puede medir temperaturas en el rango de 0 a 350°C (CEIV, Termopar Tipo T, 2025).

2.9.6 Termopar Tipo K (Cromel/Alumen):

En la figura 29, se muestra el termopar tipo K, es un sensor de temperatura comúnmente utilizado en aplicaciones industriales, especialmente en entornos de alta temperatura. El Termopar tipo K es el más popular debido a su gran rango de temperatura y su bajo costo, tiene un rango de temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+1317\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($2400\text{ }^{\circ}\text{F}$), se recomienda utilizar

hasta temperaturas de 1150 °C (2100 °F). Tiene una sensibilidad entre 41 a 42 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ aproximadamente y una precisión de $\pm 0.7^\circ\text{C}$ (Logicbus, 2025).

Código ANSI	Combinación de Aleaciones		Codificación de Colores	
	+ Plomo	- Plomo	Grado Termopar	Intervalo Extensión
K	CHROMEL CROMEL NQUEL-CROMO Ni-Cr	ALUMEL ALUMEL NQUEL-ALUMINO Ni-Al (Magnético)		

Figura 29. Termopar tipo K.

Nota. Tomado por ceiv.

(<https://teii.mx/cable-termopar-tipo-k/>).

Nosotros nos concentraremos en el termopar Tipo K.

De todos los termopares antes mencionados el termopar más utilizado para aplicaciones industriales es el tipo K. La temperatura máxima en continuo se aproxima a los 1100 °C y en períodos cortos de tiempo alcanza los 1200 °C. Por encima de los 800°C la oxidación causa deriva y des calibración de forma más pronunciada. Aunque el tipo K es el termopar más utilizado debido a su rango y su precio. Para temperaturas entre 250 °C y 600 °C, pero especialmente entre 300 °C y 550 °C, la histéresis cíclica de temperatura puede dar errores de varios grados ((s.f.), 2025).

La termocupla tipo K varía la señal en milivoltios que entrega, por cada grado centígrado detectado.

Por ejemplo, en la siguiente figura 30, termocupla tipo K se muestra que, al someter la unión de sus dos metales a 750 °C, se obtiene en sus extremos un valor de 31,214 milivoltios.

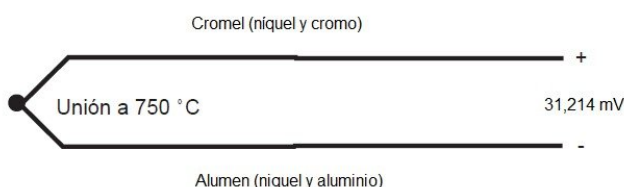


Figura 30. Termocupla tipo K.

Nota. Tomado por medición y control.

(<https://medicionycontrol.com.co/termocupla-tipo-k/>).

Rango de temperatura-termopar tipo K

La temperatura máxima de operación de un termopar está determinada primeramente por el calibre utilizado para su fabricación. El calibre es una estandarización para definir el diámetro de un alambre o cable (Control, 2025).

Como se muestra en la tabla 1, el termopar de calibre más grande es el 8 AWG o bien 3.2 mm de diámetro y el más delgado el 30 AWG cuyo diámetro es 0.25 mm, lo que cabe recalcar que mientras más grueso el alambre mayor será su capacidad para medir temperatura (Control, 2025).

Tabla 1. Calibres para termopar tipo K.

Calibre	Temperatura máxima (°C)
8 AWG	1260 °C
14 AWG	1090 °C
20 AWG	980 °C
24 AWG	870 °C
40 AWG	760 °C

Capítulo III. Desarrollo de proyecto.

3.1 Fase 1: Diseño

A lo largo de los años, la automatización en los componentes mecánicos y electrónicos representó un gran avance. Gracias a ello, se generaron beneficios significativos, así permitiendo realizar diversas tareas con mayor facilidad y otorgando una mayor versatilidad a los componentes, en este contexto, los semiconductores se adoptaron en múltiples áreas de aplicación.

Como parte de nuestra investigación previamente realizada, se observó que las grandes empresas de semiconductores efectuaban modificaciones en la estructura interna y en las propiedades de los semiconductores mediante los cambios controlados de temperatura, esto se llevó a cabo ampliamente en la industria electrónica, razón por la cual se desarrollaron hornos industriales diseñados para realizar dichas modificaciones y mejorar el desempeño de los semiconductores, a partir de ello, nos propusimos construir un horno casero que permitiera realizar modificaciones y mantener un control adecuado de temperatura, con el fin de garantizar un buen desempeño de los semiconductores.

Por lo anterior, propusimos diseñar y construir un horno de laboratorio de bajo costo que permitiera realizar modificaciones controladas y mantener un adecuado control de temperatura para así asegurar el correcto funcionamiento de los semiconductores.

Para la ejecución de este proyecto, se inició con el diseño del horno, el cual se desarrolló en el software Onshape, una solución de CAD en 3D orientando al diseño y al trabajo colaborativo en equipos de ingeniería. Este software ofreció funcionalidad completa para poder modelar piezas, ensambles y generar planos de producción. Además, sus herramientas integradas de control de versiones y colaboración facilitaron las ediciones de componentes, optimizando así el desarrollo de las tareas.

En la figura 31 se muestra la interfaz principal del software Onshape, con los planos de trabajo, lo que permitieron llevar a cabo el diseño del componente de manera clara y organizada. Cabe destacar que el diseño se elaboró tomando como referencia medidas en centímetros.

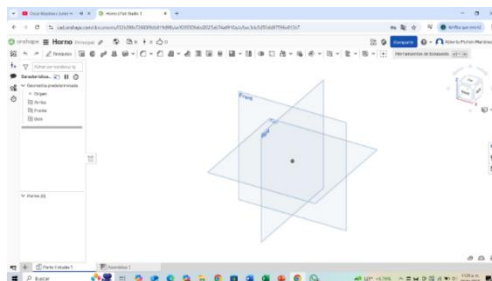


Figura 31. Perfil Principal del Software.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, marzo de 2025.

En la figura 32 se presentaron las acotaciones del diseño, donde se indicaron las dimensiones principales del horno en centímetros. El diseño contempló una longitud de 35.5 cm, una altura de 17.5 cm y un diámetro de 8 cm.

Así mismo, en la misma figura se observó que el diseño incluía dos medidas parciales de 13.7 cm y 13.8 cm, las cuales, al sumarse, dieron como resultado 27.5 cm. Al considerar el diámetro del orificio central de 8 cm, se obtuvo nuevamente la medida total de 35.5 cm, lo que confirma la exactitud de las dimensiones establecidas en el modelo.

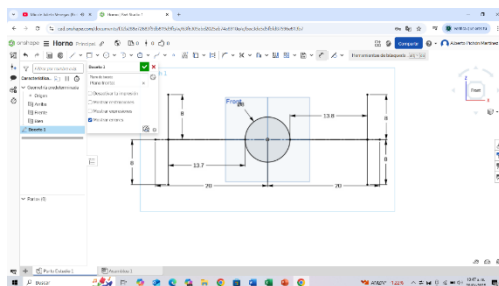


Figura 32. Diseño de medidas establecidas.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, marzo de 2025.

Posteriormente, mediante la opción de extruir en la interfaz del software de diseño, fue posible generar el modelo sólido del horno, como se apreció en las figuras 33 y 34. En esta etapa, se obtuvo una presentación tridimensional del diseño propuesto.

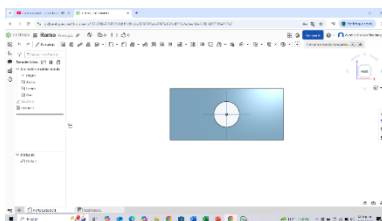


Figura 33. Pieza sólida.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, marzo de 2025.

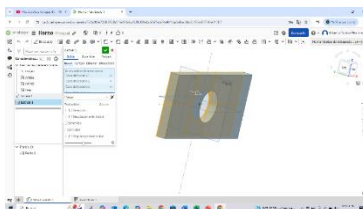


Figura 34. Pieza sólida.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, marzo de 2025.

Una vez completada esta fase, se generó la figura sólida final mostrada en la figura 35, en la cual se observó el modelo externo con una altura de 17.5 cm. En este punto, se ajustaron las longitudes requeridas, obteniéndose así el diseño completo del horno en formato digital.

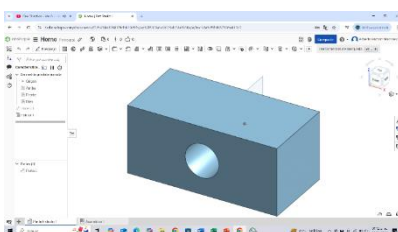


Figura 35. Diseño sólido terminado.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, marzo de 2025.

Con el diseño terminado en el software, se procedió a la construcción del prototipo físico, manteniendo las mismas dimensiones previamente establecidas. El modelo real se elaboró con material metálico, como se apreció en la figura 36.

En interior del horno se colocó una estructura de fibra de vidrio en forma de bloque cuadrado; en esta estructura se realizó un orificio de 8 cm de diámetro. Dentro de este espacio se instaló una resistencia eléctrica, la cual permitió el calentamiento controlado, dicho orificio estuvo destinado a sostener el tubo de cuarzo que contendría el material durante el proceso de tratamiento térmico.

Finalmente, en la figura 36 y 37 se representó el diseño físico del horno, correspondiente al modelado en el software.



Figura 36. Diseño físico.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, marzo de 2025.



Figura 37. Vista frontal del horno.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, marzo de 2025.

Por lo que, el diseño en fisco y la colocación de la fibra de vidrio donde se coloca la resistencia de calentamiento eléctrica para el horno de tratamiento a semiconductores quedaría como se muestra a continuación.

3.2 Fase 2: Tecnología y Herramientas Utilizadas

3.2.1 Tecnología

De acuerdo con la tecnología requerida para poder llevar a cabo este proyecto, se requirió de lo siguiente:

Computadora: Es una máquina electrónica digital programable que puede realizar cálculos y procesar información a gran velocidad. En esencia, es un dispositivo que recibió datos, los procesó según un conjunto de instrucciones programadas, y posteriormente produjo información de salida.

Software: El Arduino IDE es un software de código abierto que facilitó la programación de microcontroladores Arduino. Está diseñado para ser fácil de usar, incluso para personas sin experiencia previa en programación o electrónica.

Lenguaje de programación: Se utilizó una variante simplificada de C/C++.

Interfaz: El entorno de trabajo proporcionó una interfaz gráfica amigable con dos principales ventanas:

Editor de código: Donde se escribió el programa o código.

Consola: Donde se mostraron mensajes de compilación, carga y errores.

Características principales: El monitor serie permitió la depuración y la comunicación entre el Arduino y la PC.

Bibliotecas: El IDE incluyó una amplia colección de bibliotecas predefinidas que facilitaron la interacción con distintos componentes electrónicos como (sensores, motores, pantallas, etc.)

De acuerdo con el uso de nuestro módulo MAX 6675, se requirió la instalación de una librería adicional para que pudiera leer los comandos y señales enviados desde el software.

Para ello se utilizó de la siguiente librería:

En el software de Arduino IDE, en la interfaz del comando "Sketch" > "Incluir bibliotecas" > "gestionar bibliotecas", se buscó la librería "MAX6675" y se presionó "Enter".

Posteriormente, se hizo clic en "Install" para instalar la biblioteca, como se muestra en la figura 38.

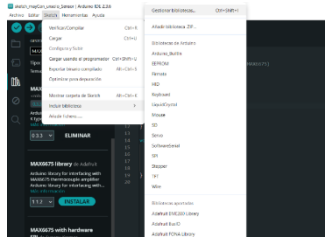


Figura 38. Instalación de la biblioteca MAX6675.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, abril de 2025.

3.2.2 Herramientas

Para poder integrar nuestro proyecto en funcionamiento, fue necesario contar con la siguiente herramienta:

1) Fibra de vidrio

En la figura 39, se puede observar la fibra de vidrio son hebras muy finas de vidrio tejidas en distintas configuraciones o formas diferentes para formar una tela o malla, el cual una de sus aplicaciones más notable sea la resistencia al calor extremo. Disipa el calor radiante con bastante eficacia y puede resistir temperaturas de hasta 1648 °C (ISOPARTNER, 2025).



Figura 39. Fibra de vidrio para horno.

Nota. Tomado por aislar, aislantes térmicos.

(<https://aislar-aislantes-y-aislamientos-termicos-y-termo-acusticos.webnode.mx/p/rollo-fibra-vidrio-aislante-para-hornos-calentador-chimeneas-estufas/>).

2) Desatornillador

Un destornillador o comúnmente conocido como desarmador como se observa en la figura 40, es una herramienta de mano que se usa para apretar o aflojar tornillos. Tiene una punta que se adapta a la forma de la cabeza del tornillo para permitir girar y aplicar fuerza de torsión al tornillo (Merlin, 2024).



Figura 40. Desarmador.

Nota. Tomado por sigasa.

(<https://sigasa.com.mx/products/desarmador-d251-dp-1-4x6-cruz-surtek?srsId=AfmBOopexuC6avNdEeWURmAxVIO9aOZL6Fz77aCle8HtOkQv1g0YtTK9>).

3) Caja de madera

Esta herramienta es fundamental para la rentabilidad y resulta clave en las operaciones de embalaje, almacenaje y transportación de productos. Las cajas de madera son altamente eficientes debido a sus múltiples aplicaciones, y se utilizan principalmente para asegurar y ajustar los materiales durante su traslado. En la figura 41 se observa este tipo de caja (PACK, 2020).



Figura 41. Caja de madera.

Nota. Tomado por artesanías.

(<https://artesaniasdemexico.com/producto/caja-de-madera-24013/>).

4) Arduino

En la figura 42 se visualiza el microcontrolador, el cual permite desarrollar el programa, cargarlo y ejecutarlo posteriormente (Torrente, 2013).



Figura 42. Arduino Uno.

Nota. Tomado por geekfactory.

(<https://www.geekfactory.mx/producto/arduino-uno-r3/?srsltid=AfmBOopvw0UnH9NKR4PyCJLtbW4BTxHHmKhtZyY1Thz44JP028u7QRmr>).

5) Jumpers

En la figura 43 se observa el cable, el cual es un elemento encargado de cerrar el circuito eléctrico mediante dos conexiones, permitiendo así la transmisión de datos (Castell, 2015).



Figura 43. Cable.

Nota. Tomado por electronics.

(<https://uelectronics.com/>).

6) Termopar tipo K

En la figura 44, podemos explicar el termopar tipo K, nos permite leer la variable de temperatura que deseamos ajustar a utilizar. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría se produce un voltaje que se puede correlacionar con la temperatura (Logicbus, 2025).



Figura 44. Termopar tipo K.

Nota. Tomado por ceiv.

(<https://teii.mx/cable-termopar-tipo-k/>).

7) Resistencia eléctrica de calentamiento

En la figura 45 se observa la resistencia eléctrica en forma de espiral, la cual es la encargada de generar calor al permitir el paso de corriente a través del conductor. Este flujo de electrones produce el calentamiento necesario para el funcionamiento del sistema (Koops, 2025).



Figura 45. Resistencia eléctrica.

Nota. Tomado por Ohmtronics.

(<https://www.ohmtronics.com/producto/resistencia-electrica-tipo-aletada/>).

8) Módulo MAX6675

En la figura 46 se muestra, el módulo Max 6675 es un convertidor Analógico a digital especializado para termopares tipo K. Con este módulo es posible conectar fácilmente un termopar a cualquier microcontrolador a través de una interfaz SPI unidireccional (Mechatronics, 2025).



Figura 46. Módulo MAX 6675 pines.

Nota. Tomado por geekfactory.

(<https://www.geekfactory.mx/producto/max6675-modulo-interfaz-para-termopar-tipo-k/?srsltid=AfmBOopWydKTW9GzTfaCeve8p2Fc-ySvdHc7SZQlIK2zTpZsdKXvdgdX>).

3.3 Fase 3: Desarrollo del Prototipo

3.3.1 Principio del funcionamiento

Al hacer uso de la resistencia, esta debió estar energizada por electricidad. La electricidad pasó por un conductor, el cual el conductor permitió el flujo de corriente eléctrica, donde parte de la energía cinética de los electrones se transformó en calor debido al choque que sufren los electrones con las moléculas del conductor.

La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica dependió directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo durante el cual circuló por el conductor y de la resistencia que el mismo opuso al paso de la corriente (Francis, 1981). Matemáticamente, esto se expresó mediante la siguiente fórmula:

$$Q = I^2 * R * t \quad (1)$$

Donde:

Q = Es la energía calorífica producida por la corriente expresada en Joules.

I = Intensidad de la corriente que circula por el conductor en Amperes.

R = Resistencia eléctrica del conductor expresada en ohm.

T = Tiempo en segundos.

A continuación, se realizó el cálculo del área del horno. Se recordó que, en la fase previa del diseño del horno, se explicó que este contaba con un orificio de 8 cm de diámetro, en cuyo interior se instaló una resistencia eléctrica de calentamiento. Al poner en funcionamiento dicha resistencia, esta pudo calentar al tubo de cuarzo que se colocó en el orificio situado.

Para llevar a cabo esto de manera eficiente, se consideró que la conducción es el mecanismo de transferencia de calor en el que la energía térmica se transfirió de un punto a otro mediante la interacción de los átomos y moléculas de la materia a través del conductor.

Se tomó en cuenta el área del horno utilizando la siguiente fórmula:

Dado que el horno tenía forma rectangular, se empleó la fórmula del área para un rectángulo:

$$A = B * H \quad (2)$$

$$A = (0.30m)(0.14m)(6)$$

$$A_{total} = 0.252 \, m^2$$

Por lo que el área del horno es de $0.252 \, m^2$.

Asimismo, se consideró el volumen del cilindro correspondiente al orificio central, anteriormente descrito, y para este cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

Fórmula del volumen del cilindro:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (3)$$

Datos:

Diámetro 8 cm con un radio de 4 cm = 0.04 m.

Y una longitud= 16 cm = 0.16 m.

Despejamos:

$$V = \pi \cdot (0.04)^2 \cdot 0.16$$

$$V = \pi \cdot (0.04)^2 \cdot 0.16$$

$$V = 8.0424 \times 10^{-4}$$

El cilindro presentó un volumen de $8.042 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.

Contando ya con el área que fue de 0.252 m^2 , se procedió a calcular la resistencia térmica empleando la fórmula correspondiente:

$$R_T = \frac{L1}{K1A} + \frac{L2}{K2A} + \frac{L3}{K3A} \quad (4)$$

L1, L2, L3 = 1" = 0.0254 m.

1" = Es el espesor de cada pared.

K = Conductividades térmicas.

K1 = 1.05 W/mK

K2 = 0.07 W/mK

K3 = 0.3 W/mK

A = 0.252 m^2

Sustituimos valores de la anterior ecuación:

$$R_T = \frac{L1}{K1A} + \frac{L2}{K2A} + \frac{L3}{K3A}$$

$$R_T = \frac{0.0254m}{1.05W/mK(0.042m^2)} + \frac{0.0254m}{0.07W/mK(0.042m^2)} + \frac{0.0254m}{0.3W/mK(0.042m^2)}$$

$$R_T = 0.5759Kw + 0.08639Kw + 0.02015Kw$$

$$R_T = 0.68244K/w$$

Por lo que la resistencia térmica será de 0.68244 K/w.

Ahora con la siguiente fórmula que se muestra, se obtendrá la potencia que se necesitará para disipar las resistencias eléctricas para obtener la temperatura deseada.

$$Q = \frac{\Delta T}{RT} \quad (5)$$

Donde:

ΔT = Diferencia de temperatura entre dos puntos.

RT = Resistencia total.

Por lo que, tendremos una temperatura interior de 700°C y la temperatura exterior del clima.

$$T_{int} = 700^\circ c \text{ (973K)}$$

$$T_{ext} = 25^\circ c \text{ (298K)}$$

$$R_T = 0.68244K/w$$

$$q = \frac{973 - 298K}{0.68244K/w}$$

$$q = 989.097W$$

De acuerdo con lo mencionado previamente, se utilizó una resistencia eléctrica de calentamiento, obteniéndose como resultado una resistencia de 11.7 ohmios.

Se recordó que el voltaje es la diferencia de potencial entre los conductores. Para poder definir la corriente se usa de la fórmula de la ley de ohm, la cual establece la relación entre voltaje, corriente y resistencia en un circuito eléctrico.

La Ley de Ohm indicó que la corriente es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia del circuito.(Servicios Condumex, 2009). Matemáticamente, se expresó como:

$$V = I * R \quad (6)$$

Donde:

V: Voltaje V

I: Corriente A

R: Resistencia Ω

Para poder encontrar la corriente de la resistencia, se utilizó la fórmula correspondiente, por lo que esta quedó despejada de la siguiente manera:

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

$$I = \frac{127V}{11.7\Omega} = 10.85 A$$

Como resultado, la resistencia presentó una corriente de 10.85 amperes.

Posteriormente, se hizo uso de la Ley de Watt, la cual estableció que la potencia consumida por una carga es directamente proporcional al voltaje suministrado y a la corriente que circula por el circuito (Domínguez, 2009). Matemáticamente, se expresó como:

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

Donde:

P: Potencia (Watts)

V: Voltaje (V)

I: Corriente (A)

La potencia se calculó de la siguiente manera:

$$P: (127V)(10.85A) = 1377.95 \text{ Watts}$$

Por lo tanto, el circuito consumió 1377.95 *Watts*.

Para este horno utilizó el material especializado para altas temperaturas, en este caso una aleación Níquel – Cromo (Ni-Cr), la cual ofreció una alta resistencia al calor y una mayor vida útil, debido a que mantuvo su integridad estructural aun en condiciones térmicas elevadas.

Como se mencionó anteriormente, se empleó una resistencia de aleación Níquel-Cromo de calibre 18.

Diámetro del alambre (AWG 18): $D = 1.080 \text{ mm}$.

Radio: $r = 0.540 \text{ mm} - 0.000540 \text{ m}$.

Resistividad de (20°C): $\rho = 1.77 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$

Factor de temperatura de trabajo: $C_t: 1.045$

Con esta información, se procedió al cálculo del área de la sección transversal del alambre:

$$A = \pi r^2 \quad (8)$$

$$A = \pi(0.000540m)^2$$

$$A = 9.16088 \times 10^{-7} m^2$$

Resistencia eléctrica a 20 °C.

Este dato resulto importante, ya que permitió conocer la resistencia por metro que existe en el nicromo.

$$R_{20} = \frac{\rho * L}{A} \quad (9)$$

Donde:

ρ = Resistividad.

L = Longitud.

A = Área de sección transversal.

Sustituimos valores:

$$R_{20} = \frac{1.77 \times 10^{-6} \Omega \cdot m * 1 m}{9.16088 \times 10^{-7} m^2}$$

Obtenemos el resultado:

$$R_{20} = 1.932 \Omega.$$

De esta manera, se determinó que por cada metro existieron 1.932 Ω .

La resistencia eléctrica de trabajo se calculó mediante el coeficiente de resistividad, ya que este coeficiente de resistividad permitió conocer el cambio de resistencia debido a los cambios de temperatura. El valor del coeficiente para el nicromo a 1100 °C fue de 1.045, quedando el cálculo de la siguiente manera:

$$R_t = C_t * R_{20} \quad (10)$$

$$R_t = 1.045 * 1.932 \Omega$$

$$R_t = 2.018 \Omega.$$

Con este resultado se determinó que la resistencia eléctrica a la temperatura de trabajo cambió a 2.018 Ω por metro.

Finalmente, con el valor obtenido de 11.7 Ω para la resistencia total del horno y el valor de 2.018 Ω por metro correspondiente a la resistencia de trabajo, fue posible calcular la cantidad de material necesaria para poder hacer uso de la resistencia:

$$L = \frac{R}{R_T} \quad (11)$$

De esta forma obtenemos:

$$L = \frac{11.7 \, \Omega}{2.018 \, \Omega/m}$$

$$L = 5.79 \, m$$

3.3.2 Simulación del circuito en software Proteus

En esta etapa se procedió al desarrollo de la simulación del circuito electrónico, utilizando como elementos principales un microcontrolador Arduino, un termopar tipo K, el módulo MAX6675, resistencias de 1k y cables de conexión (jumpers).

Para la simulación se llevó a cabo en el software Proteus, ya que es una aplicación especializada en el diseño y prueba de proyectos electrónicos. Este programa permitió realizar el esquema electrónico, la programación del sistema, la simulación del conjunto, verificación de errores y la construcción del prototipo.

En el circuito, el microcontrolador Arduino funcionó como el elemento central de control y procesamiento de datos. Este fue programado mediante el entorno Arduino IDE, el cual contó con bibliotecas específicas que facilitaron la integración de sensores y módulos externos. En este caso, dichas librerías permitieron implementar la programación necesaria para la lectura precisa de la temperatura a través de los termopares.

El termopar tipo K, con un rango de 0 °C a 1024 °C, se colocó en la parte lateral del horno como se observó en la figura 37, en el orificio donde se ubicó la resistencia de calentamiento. De esta manera, el sensor detectó la temperatura generada y envió la señal al sistema de control, permitiendo verificar que se alcanzara la temperatura deseada en el tubo de cuarzo.

El sensor no se conectó directamente al Arduino, sino a través del módulo MAX6675, que se encargó de digitalizar la señal de temperatura y enviarla a la interfaz del monitor serial en Arduino IDE. Para establecer estas conexiones, se utilizaron cables de tipo jumper, los cuales permitieron enlazar el módulo y los sensores con el microcontrolador.

En la figura 47, se mostró la conexión del termopar tipo K al módulo MAX6675. Ambos elementos contaron con polaridad positiva (+) y negativa (-), por lo que deben conectarse de acuerdo con su polaridad.

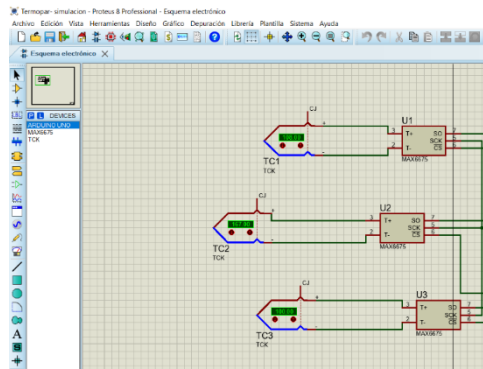


Figura 47. Polaridad de termopar y Módulo MAX6675.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, abril de 2025.

El módulo MAX6675 que disponía de 5 pines identificados como VCC, GND, SCK, CS y SO. En la tabla 2, se representó la asignación de pines entre el módulo y el microcontrolador Arduino, detallando la sintaxis de conexión empleada para los tres módulos y los tres termopares empleados.

Tabla 2. Explicación de conexión de pines.

Conexiones eléctricas para cada termopar MAX667			
Función	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3
VCC	3.3v	3.3v	3.3v
GND	GND	GND	GND
SO (DATA)	Pin 7	Pin 8	Pin 9
CS (CHIP SELECT)	Pin 5	Pin 4	Pin 3
SCK (CLOCK)	Pin 6 (compartido)	Pin 6	Pin 6

Una vez definidos los pines, se procedió a realizar la conexión y la simulación del sistema en Proteus. En la figura 48, se observó el conexionado completo de los tres módulos MAX6675 y los tres termopares conectados al microcontrolador Arduino. Gracias a esta configuración, los sensores son capaces de transmitir al sistema las señales de temperatura necesarias para el control y la estabilización térmica.

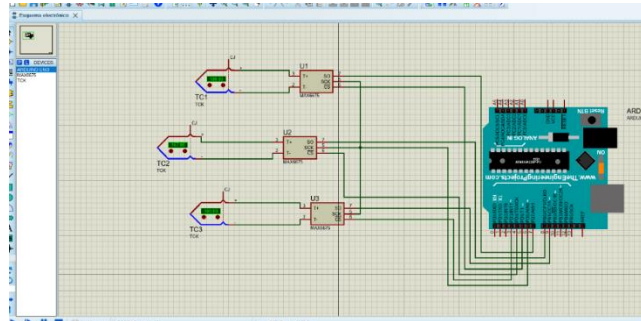


Figura 48. Simulación de circuito en software Proteus.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, abril de 2025.

Finalmente, tal como se muestra en la figura 48, se obtuvo el circuito completo en la simulación. Tras verificar su funcionamiento correcto y libre de errores, se procedió a preparar el montaje físico del prototipo. No obstante, antes de avanzar al ensamblaje, fue necesario desarrollar el código del programa para el microcontrolador, lo cual se describió en el apartado siguiente.

3.3.3 Programa de Arduino

En este punto se creó el programa de Arduino con el fin de cargarlo y ejecutarlo adecuadamente, permitiendo que el circuito funcionara de manera óptima. El programa quedó definido de la siguiente manera:

```
#include "MAX6675.h"
```

```
const int dataPins[] = {7, 8, 9}; // SO para cada termopar
```

```
const int clockPin = 6; // SCK (compartido)
```

```
const int selectPins[] = {5, 4, 3}; // CS para cada termopar
```

```
MAX6675 termopares[] = {
  MAX6675(selectPins[0], dataPins[0], clockPin),
  MAX6675(selectPins[1], dataPins[1], clockPin),
  MAX6675(selectPins[2], dataPins[2], clockPin)
```

```
};
```

```
const int tiemposLectura[] = {2000, 4000, 6000}; // ms (T1 cada 2s, T2 cada 4s, T3 cada 6s)
```

```
unsigned long ultimasLecturas[] = {0, 0, 0};
```

```
// Ángulos (puedes modificarlos según ubicación en el horno)
```

```
int angulos[] = {0, 120, 240};
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(115200);
```

```
    for (int i = 0; i < 3; i++) {
```

```
        termopares[i].begin();
```

```
        termopares[i].setSPISpeed(4000000);
```

```
    }
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
    unsigned long actual = millis();
```

```
    for (int i = 0; i < 3; i++) {
```

```
        if (actual - ultimasLecturas[i] >= tiemposLectura[i]) {
```

```
            int estado = termopares[i].read();
```

```
            float temp = termopares[i].getTemperature();
```

```
            Serial.print("Termopar ");
```

```
            Serial.print(i + 1);
```

```
            Serial.print(" (Ángulo ");
```

```
            Serial.print(angulos[i]);
```

```
Serial.println("°:");
```

```
if (estado == 0) {
    Serial.print("temp: ");
    Serial.println(temp);
} else if (estado == 4) {
    Serial.println("Revisar termopar");
} else if (estado == 129) {
    Serial.println("Sin comunicacion");
}
```

```
Serial.println(); // Línea en blanco
```

```
ultimasLecturas[i] = actual;
```

$$\left. \begin{array}{l} \} \\ \} \\ \} \end{array} \right\}$$

En la siguiente figura 49, podemos ver la simulación de los tres termopares, que por medio del software en la interfaz que nos ofrece Arduino en, monitor serial podemos ir verificando la temperatura actual de nuestros tres termopares tipo K.

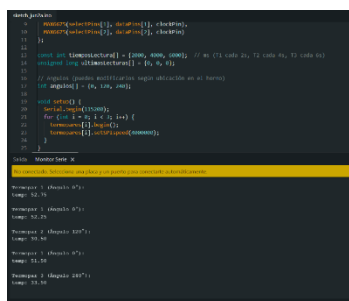


Figura 49. Simulación de 3 termopares.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, abril de 2025.

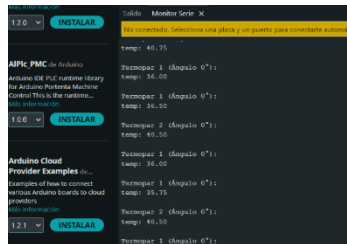


Figura 50. Simulación de 3 termopares.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, abril de 2025.

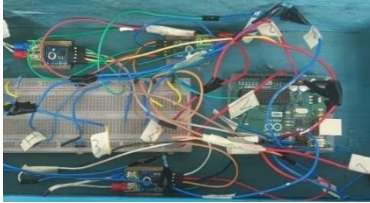
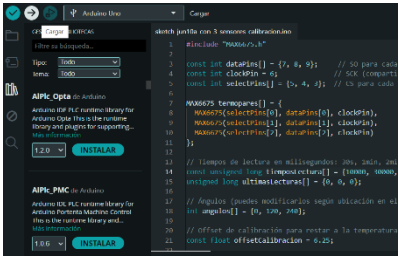
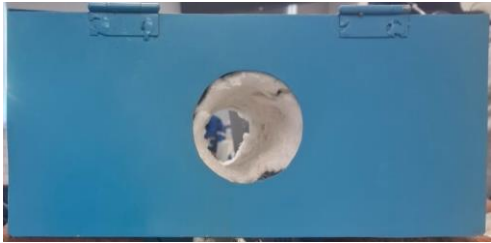
Una vez cargado el programa, procedemos a compilarlo verificamos que no exista errores en la compilación. Verificando que no existe ningún error procedemos a calentar los termopares y visualizamos en el monitor serial que mande datos de la temperatura, y de esa manera hemos concluido nuestro programa y simulación de nuestros termopares a nuestro monitor serial del software Arduino.

Ahora se realizará el montaje de nuestro circuito por lo que se verá en el siguiente punto.

3.4 Montaje

A continuación, se describieron los pasos realizados para el montaje del circuito, asegurando su correcto funcionamiento.

Montaje	Pasos
	Figura 1. Se colocó la resistencia eléctrica de calentamiento en el horno casero de fibra de vidrio, encargada de generar el calor necesario hacia el tubo de cuarzo.
	Figura 2. Se verificó del estado de la resistencia eléctrica mediante un multímetro, asegurando su continuidad y correcto funcionamiento.
	Figura 3. Se instaló de la fibra cerámica refractaria de alta temperatura en el interior del horno, alrededor de la resistencia eléctrica, con el fin de proteger el tubo de cuarzo y conservar el calor.
	Figura 4. Se conectó el cable de alimentación desde la fuente de voltaje del dimmer hacia la resistencia eléctrica, utilizando tornillos y tuercas para garantizar una sujeción firme y una conducción adecuada del voltaje que permitió el calentamiento de la resistencia.
	Figura 5. Se conectó e identificó el módulo MAX6675, encargado de

	convertir la señal analógica de los termopares a digital con una resolución de 12 bits, permitiendo medir temperaturas en un rango de 0 °C a 1024 °C.
	Figura 6. Se conectaron los tres termopares tipo K al microcontrolador Arduino con el propósito de medir las temperaturas en distintos puntos del horno.
	Figura 7. Una vez conectado el circuito al microcontrolador y cargado el programa en el entorno de Arduino se procedió a la lectura de las temperaturas a través del monitor serial.
	Figura 8. Se realizó la posición final de los tres termopares en el interior del horno, dejándolos listos para las mediciones de temperatura durante las pruebas para la caracterización.

Con estos pasos se concluyó el montaje del prototipo, garantizando la correcta interconexión de los componentes electrónicos y térmicos del sistema.

Capítulo IV. Caracterización de horno.

4.1 Caracterización

En esta sección se presenta el proceso de caracterización térmica del horno, cuyo propósito es analizar el comportamiento del sistema de calentamiento por medio de la resistencia, identificar su modelo dinámico y determinar los parámetros necesarios para el diseño del controlador PID (Hernández R. H., 2001).

4.2 Caracterización experimental de calentamiento

Para la caracterización del horno, se empleó un dimmer de voltaje con el propósito de regular la elevación de la temperatura, tal como se muestra en la figura 51. Dicho dispositivo cuenta con diez posiciones de regulación, numeradas del 1 al 10, además de una entrada y una salida eléctrica. La entrada recibe el voltaje proveniente del tomacorriente, mientras que la salida se conecta directamente a la resistencia de nicromo del horno, permitiendo controlar el suministro de potencia eléctrica.



Figura 51. Dimmer.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, mayo de 2025.

En la figura 52 se presentó el horno casero para semiconductores, el cual fue interconectado al dimmer mencionado. Este método de control permitió ajustar la velocidad de calentamiento y mantener una temperatura estable durante las pruebas experimentales. El monitoreo térmico se llevó a cabo mediante el monitor serial del software Arduino IDE, utilizando termopares tipo K instalados estratégicamente en el interior del horno para registrar la temperatura en tiempo real.



Figura 52. Horno con dimmer.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, mayo de 2025.

El procedimiento experimental consistió en elevar progresivamente la temperatura del horno desde 100 °C hasta 750 °C, registrando los valores de temperatura máxima y mínima, así como los tiempos de subida y bajada. Las mediciones se realizaron con un cronómetro digital, promediando seis lecturas por cada punto de temperatura con el fin de garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los datos.

Finalmente, se presentan los datos experimentales obtenidos para cada temperatura. Cada tabla incluyó los valores de subida y bajada de la temperatura, junto con el tiempo requerido para alcanzar dichos valores. La información completa se anexó desde la tabla 3 hasta la tabla 10.

Temperatura deseada a alcanzar:
100 °C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4	Vmax5	Vmax6
Subida	Tmax: 120.25	Tmax: 108.75	Tmax: 108.00	Tmax: 108.00	Tmax: 107.50	Tmax: 106.75
Tiempo	Tiempo: 8:50min	Tiempo: 5:02min	Tiempo: 5:10	Tiempo: 5:30	Tiempo: 5:23	Tiempo: 5:18
Bajada	Tmin: 96.75	Tmin: 97.00	Tmin: 98.50	Tmin: 98.75	Tmin: 99.25	Tmin: 99.75
Tiempo	Tiempo: 7:57min	Tiempo: 5:11	Tiempo: 4:23	Tiempo: 4:08min	Tiempo: 4:00min	Tiempo: 3:52min

Tabla 3. Temperatura de 100 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
200 °C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4		
Subida	Tmax: 215.25	Tmax: 207.50	Tmax: 206.75	Tmax: 205.50	Tmax: 205.00	Tmax: 204.50
Tiempo	Tiempo: 7:30	Tiempo: 4:25min	Tiempo: 2:20min	Tiempo: 2:20min	Tiempo: 2:15min	Tiempo: 2:00min
Bajada	Tmin: 196.75	Tmin: 197.50	Tmin: 197.75	Tmin: 198.00	Tmin: 198.75	Tmin: 198.25

Tiempo	Tiempo: 6:25min	Tiempo: 2:20min	Tiempo: 2:15min	Tiempo: 2:15min	Tiempo: 2:00min	Tiempo: 1:55min
--------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

Tabla 4. Temperatura de 200 °C.

Temperatura deseada a alcanzar: 300 °C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4		
Subida	Tmax: 307.50	Tmax: 304.75	Tmax: 304.25	Tmax: 304.00	Tmax: 303.00	Tmax: 302.25
Tiempo	Tiempo: 10:25min	Tiempo: 4:35min	Tiempo: 2:29min	Tiempo: 2:04min	Tiempo: 1:55min	Tiempo: 1:40min
Bajada	Tmin: 297.75	Tmin: 296.25	Tmin: 296.75	Tmin: 297.75	Tmin: 298.75	Tmin: 299.00
Tiempo	Tiempo: 3:00min	Tiempo: 2:10min	Tiempo: 2:31min	Tiempo: 2:22min	Tiempo: 2:15min	Tiempo: 2:00min

Tabla 5. Temperatura de 300 °C.

Temperatura deseada a alcanzar: 400 °C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4	Vmax5	Vmax6
Subida	Tmax: 408.75	Tmax: 404.25	Tmax: 404.00	Tmax: 403.25	Tmax: 402.75	Tmax: 402.00
Tiempo	Tiempo: 8:54min	Tiempo: 2:00min	Tiempo: 1:50min	Tiempo: 1:42min	Tiempo: 1:25min	Tiempo: 1:18min
Bajada	Tmin: 396.50	Tmin: 397.00	Tmin: 396.00	Tmin: 397.75	Tmin: 398.75	Tmin: 398.75
Tiempo						

	Tiempo: 3:10min	Tiempo: 2:30min	Tiempo: 2:50min	Tiempo: 2:20min	Tiempo: 2:05min	Tiempo: 1:55min
--	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

Tabla 6. Temperatura de 400 °C.

Temperatura deseada a alcanzar: 500 °C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4	Vmax5	Vmax6
Subida	Tmax: 507.25	Tmax: 505.25	Tmax: 504.75	Tmax: 503.50	Tmax: 503.50	Tmax: 503.00
Tiempo	Tiempo: 9:10min	Tiempo: 1:20min	Tiempo: 1:05min	Tiempo: 1:00min	Tiempo: 1:00min	Tiempo: 1:00min
Bajada	Tmin: 496.00	Tmin: 497.25	Tmin: 497.50	Tmin: 498.00	Tmin: 498.75	Tmin: 498.75
Tiempo	Tiempo: 1:50min	Tiempo: 1:05min	Tiempo: 1:25min	Tiempo: 1:15min	Tiempo: 1:05min	Tiempo: 1:03min

Tabla 7. Temperatura de 500 °C.

Temperatura deseada a alcanzar: 600 °C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4	Vmax5	Vmax6
Subida	Tmax: 604.75	Tmax: 603.50	Tmax: 603.75	Tmax: 602.75	Tmax: 603.50	Tmax: 602.00
Tiempo	Tiempo: 4:18min	Tiempo: 1:10min	Tiempo: 1:00min	Tiempo: 1:0min	Tiempo: 1:00min	Tiempo: 58s
Bajada	Tmin: 595.50	Tmin: 596.00	Tmin: 596.25	Tmin: 597.25	Tmin: 597.25	Tmin: 598.00
Tiempo	Tiempo: 1:20min	Tiempo: 1:30min	Tiempo: 1:20min	Tiempo: 1:15min	Tiempo: 1:10min	Tiempo: 1:00min

Tabla 8. Temperatura de 600 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
700 °C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4	Vmax5	Vmax6
Subida	Tmax: 704.425	Tmax: 703.25	Tmax: 703.00	Tmax: 702.50	Tmax: 702.25	Tmax: 702.00
Tiempo	Tiempo: 5:53min	Tiempo: 0:40s	Tiempo: 0:40s	Tiempo: 0:38s	Tiempo: 0:35s	Tiempo: 0:30s
Bajada	Tmin: 696.75	Tmin: 696.75	Tmin: 697.75	Tmin: 697.50	Tmin: 698.00	Tmin: 698.00
Tiempo	Tiempo: 1:30min	Tiempo: 1:28min	Tiempo: 1:25min	Tiempo: 1:20min	Tiempo: 1:18min	Tiempo: 1:18min

Tabla 9. Temperatura de 700 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
750 °C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4	Vmax5	Vmax6
Subida	Tmax: 753.25	Tmax: 752.50	Tmax: 752.50	Tmax: 752.00	Tmax: 752.00	Tmax: 751.25
Tiempo	Tiempo: 8:10min	Tiempo: 1:00min	Tiempo: 0:50s	Tiempo: 0:48s	Tiempo: 0:45s	Tiempo: 0:30s
Bajada	Tmin: 746.00	Tmin: 746.25	Tmin: 747.00	Tmin: 747.00	Tmin: 747.75	Tmin: 748.00
Tiempo	Tiempo: 1:36min	Tiempo: 1:33min	Tiempo: 1:28min	Tiempo: 1:26min	Tiempo: 1:20min	Tiempo: 1:10min

Tabla 10. Temperatura de 750 °C.

El comportamiento general mostro un incremento progresivo de la velocidad de respuesta del sistema conforme la temperatura aumentaba, evidenciando una reducción en el tiempo de asentamiento y un mayor factor de amortiguamiento.

Para analizar y registrar el incremento de temperatura, de 100 °C a 750 °C, se utilizó la cámara termográfica modelo Fluke Ti32, donde se pudo apreciar la distribución del calor, a una temperatura de 600 °C, la cual se muestra en la figura 53, donde se pudo observar que la resistencia ubicada en el interior del horno genera una uniformidad térmica aproximadamente del 90 %.

La imagen termográfica obtenida evidenció una distribución homogénea del calor en el interior del horno, lo que confirmó la eficiencia del diseño térmico y la adecuada transferencia de energía hacia el volumen de trabajo durante el proceso de calentamiento.

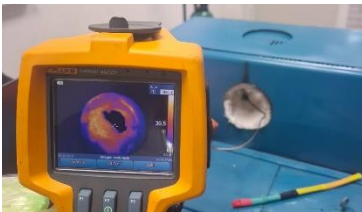


Figura 53. Cámara termográfica.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, mayo de 2025.

4.3 Cálculo de parámetros dinámicos

Obtenidos los datos experimentales, se calcularon los parámetros característicos de un sistema de segundo orden: porcentaje de sobreelongación (Mp), factor de amortiguamiento relativo (ξ), frecuencia natural amortiguada (wd), frecuencia natural no amortiguada (Wn), sigma (σ), y los tiempos de asentamiento al 2% y al 5%.

Los cálculos se llevaron a cabo en la aplicación excel, aplicando las fórmulas correspondientes. A continuación, se muestran las figuras de los resultados obtenidos.

Temperatura alcanzar	Temperatura maxima	Procentaje	Fórmula sobreelongación Máxima	Resultado de Mp
100	120.25	100%	$M_p = \frac{C(T_p) - C(\infty)}{C(\infty)} \cdot 100\%$	0.2025
150	164.25	100%		0.095
200	215.25	100%		0.07625
300	307.5	100%		0.025
350	366	100%		0.045714286
400	408.75	100%		0.021875
450	460	100%		0.022222222
500	507.25	100%		0.0145
550	555.5	100%		0.01
600	604.75	100%		0.007916667
650	654.75	100%		0.007307692
700	704.25	100%		0.006071429
750	753.25	100%		0.004333333

Figura 54. Valores de sobre elongación máxima.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, mayo de 2025.

En la figura 54 se observó la relación entre la temperatura deseada y el porcentaje de la sobreelongación máxima. Los valores obtenidos permitieron identificar el nivel de sobrepaso del sistema en cada punto de temperatura.

Formula de amortiguamiento ζ	Resultado de ζ
$\zeta = \frac{[\ln(Mp)]^2}{\pi^2 + [\ln(Mp)]^2}$	0.453154611
	0.599621435
	0.633729977
	0.761322568
	0.700690031
	0.772551504
	0.77126352
	0.803049281
	0.826084441
	0.838729449
	0.842772773
	0.851615296
	0.866025698

Figura 55. Valores de factor de amortiguamiento.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, mayo de 2025.

La figura 55 presentó los valores calculados del factor de amortiguamiento relativo, obtenidos a partir de MP. Se apreció un incremento del amortiguamiento conforme aumenta la temperatura, lo que indica un comportamiento más estable.

Tiempo	Segundos	Formula de Omega D Wd	Resultado Wd
8.5	530	$W_d = \frac{\pi}{T_p}$	0.0059275
7.11	431		0.0072891
7.3	450		0.0069813
10.25	625		0.0050266
7.5	470		0.0066843
8.54	534		0.0058831
5.5	350		0.0089760
9.1	550		0.0057120
6	360		0.0087267
4.18	258		0.0121767
18.2	1100		0.0028560
5.53	353		0.0088997
8.1	490		0.0064114

Figura 56. Valores de frecuencia natural amortiguada (Wn).

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, mayo de 2025.

Fórmula Frecuencia Natural Wn	Resultado Wn
$W_n = \frac{W_d}{\sqrt{1 - \xi^2}}$	0.013081
	0.012156
	0.011016
	0.006602
	0.009540
	0.007615
	0.011638
	0.007113
	0.010564
	0.014518
	0.003389
	0.010450
	0.007403

Figura 57. Valores de frecuencia natural no amortiguada (Wn).

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, mayo de 2025.

Las figuras 56 y 57 mostraron las frecuencias naturales amortiguadas y no amortiguadas del sistema, las cuales reflejaron la velocidad con la que esté sistema respondió ante variaciones térmicas.

Formula de sigma σ	Resultado de σ
$\sigma = \xi(W_n)$	0.0059275
	0.0072891
	0.0069813
	0.0050266
	0.0066843
	0.0058831
	0.0089760
	0.0057120
	0.0087267
	0.0121767
	0.0028560
	0.0088997
	0.0064114

Figura 58. Valores de sigma.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, mayo de 2025.

La figura 58 mostró los valores de sigma, relacionados con la rapidez con la que el sistema alcanzó el estado estable.

Fórmula tiempo de asentamiento 2%	Resultado	Tiempo Minutos
$T_s = \frac{4}{\sigma}$	674.815	11.247
	548.765	9.146
	572.956	9.549
	795.773	13.263
	598.421	9.974
	679.908	11.332
	445.633	7.427
	700.280	11.671
	458.365	7.639
	328.495	5.475
	1400.560	23.343
	449.453	7.491
	623.886	10.398

Figura 59. Valores de tiempo de asentamiento 2%.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, mayo de 2025.

Fórmula tiempo de asentamiento 5%	Resultado Ts	Minutos
$T_s = \frac{3}{\sigma}$	506.112	8.435
	411.574	6.860
	429.717	7.162
	596.830	9.947
	448.816	7.480
	509.931	8.499
	334.225	5.570
	525.210	8.754
	343.774	5.730

Figura 60. Valores de tiempo de asentamiento 5%.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, mayo de 2025.

En las figuras 59 y 60 se presentaron los tiempos de asentamiento al 2% y al 5%. Se observó que, el tiempo de asentamiento disminuyó, evidenciando un comportamiento más rápido.

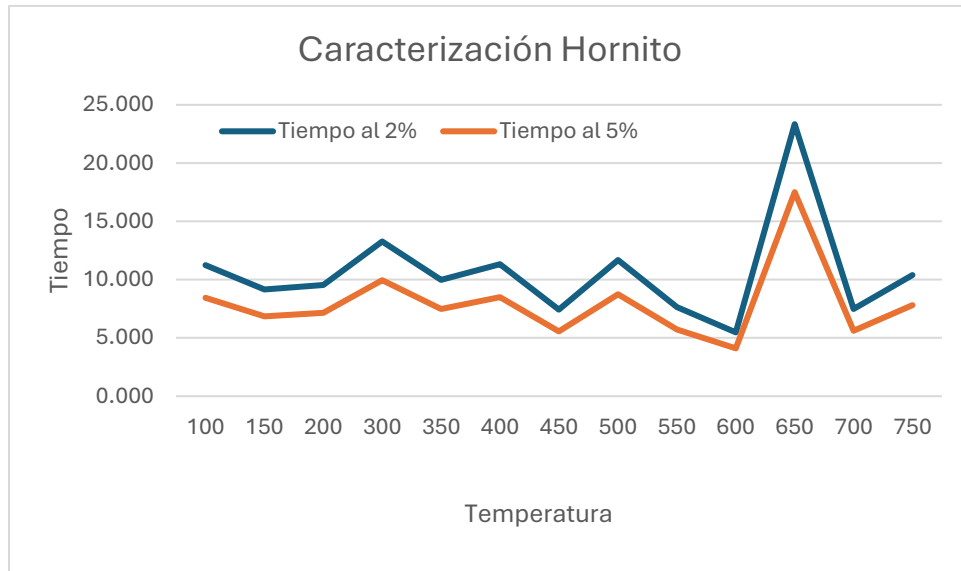
Con los resultados de tiempo de asentamiento se generó la gráfica 1, donde la línea azul representó al 2 % y la línea naranja el asentamiento al 5 %.

Esta gráfica fue obtenida mediante la aplicación de excel; en el eje X se mostró la temperatura, y en el eje Y el tiempo correspondiente.

En la línea azul está representando el tiempo de asentamiento del 2%.

La línea naranja está representando el tiempo de asentamiento del 5%.

La caracterización presentada abarco el rango de 100 °C a 750 °C de temperatura.



Gráfica 1. Tiempo de asentamiento de 2% y 5%.

4.4 Modelo de un sistema de control de segundo orden

Se tuvo en cuenta la existencia de dos tipos de control: de lazo abierto y lazo cerrado. En este caso, se empleó un sistema de lazo cerrado.

La principal diferencia entre ambos sistemas radica en el monitoreo continuo de la variable que se desea controlar. Un sistema de lazo abierto no conoce el comportamiento de la variable de salida; es decir, no realiza ninguna corrección con la base en dicha salida. Por el contrario, un sistema de lazo cerrado monitorea constantemente la variable de salida, comparándola con una señal de referencia para evaluar su evolución y corregir cualquier desviación (Bolton, 1998). Este principio permitió al sistema de lazo cerrado ajustara su comportamiento en tiempo real, con el objetivo de mantener la temperatura del horno, dentro de los valores deseados.

A partir de los parámetros calculados, se determinó el modelo matemático de segundo orden del sistema térmico. Para una entrada de impulso unitario $r(t)$, su transformada de Laplace correspondiente es la unidad, o $R(s) = 1$. La respuesta de impulso unitario $C(s)$ del sistema del segundo orden (Ogata, 2010), matemáticamente se expresa de la siguiente manera.

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (13)$$

Donde:

ξ = Factor de amortiguamiento relativo.

ω_n = Frecuencia natural.

S = Impulso del sistema.

Una vez obtenidos los valores calculados previamente, se sustituyeron en la ecuación, quedando expresado el modelo matemático del sistema de la siguiente manera:

$$C(s) = \frac{(0.013801)^2}{s^2 + 2(0.4531)(0.013081)s + (0.013081)^2}$$

Los valores sustituidos en la fórmula de arriba fueron valores calculados con ayuda de la figura 55, del punto 4.3, del capítulo V.

Se sustituyeron los valores, con los cuales se obtuvo la respuesta a un impulso del sistema de segundo orden.

$$G(s) = \frac{0.0001904676}{s^2 + 0.1185543065s + 0.0001904676}$$

Mediante esta ecuación se identificó el comportamiento dinámico del horno. El análisis reveló que el sistema se comportó como un sistema subamortiguado, con una respuesta rápida y una estabilidad térmica dentro de los márgenes de operación.

4.5 Control PID

Con el modelo validado, se aplicó el segundo método de Ziegler – Nichols para la sintonización del controlador PID. Mediante este método fue posible determinar las ganancias con la siguiente tabla 11, que se presentó a continuación:

Tabla 11. Método Ziegler - Nichols

Controlador	Kp	Ti	Td
P	0.5Ku	∞	0
PI	0.45Ku	1/1.2Pu	0
PID	0-6Ku	0.5Pu	0.125Pu

Donde:

P = Es el controlador Proporcional.

PI = Es el controlador proporcional-integral.

PID = Es el controlador Proporcional-Integral-Derivativo.

Ku = Ganancia crítica del sistema.

Pu = Oscilación sostenida de periodo.

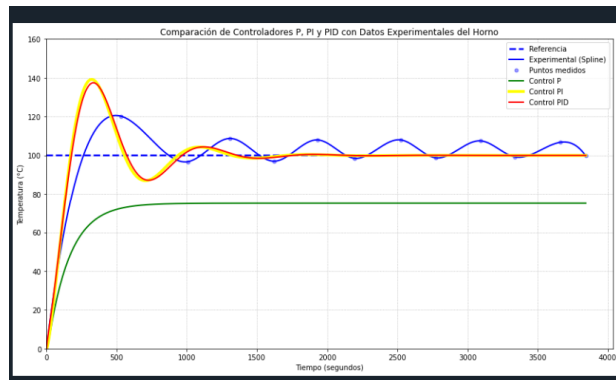
Los valores obtenidos fueron:

$P = 3$

$PI = 0.04734$

$PID = 39.6$

Una vez obtenidos los valores de los controladores P, PI y PID mediante el segundo método de Ziegler – Nichols, utilizando las fórmulas de la tabla 11 anteriormente mencionada, se realizó la simulación correspondiente en el software de Python.

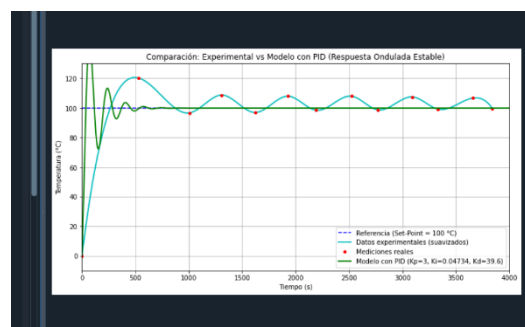


Gráfica 2. Comparación de controladores P, PI y PID con datos experimentales del horno.

En la gráfica 2 se presentó la comparación entre los controladores P, PI, y PID, junto con los datos experimentales, obtenidos durante la caracterización del horno. La línea azul punteada representó la referencia, mientras que la línea azul continua mostró los valores experimentales registrados. Los puntos marcados indican las intersecciones correspondientes a los seis valores considerados de temperatura máxima y mínima.

La gráfica verde ilustró el comportamiento del controlador P (Proporcional), mientras las gráficas amarilla y roja muy aproximadas entre sí, la gráfica amarilla representó el desempeño del controlador PI (Proporcional – Integral) y de la gráfica roja representó el controlador PID (Proporcional – Integral – Derivativo).

De esta manera, se estableció la configuración final del controlador PID aplicado al horno de tratamiento térmico para semiconductores, evidenciando su capacidad para lograr una respuesta estable, precisa y eficiente.



Gráfica 3. Controlador PID.

Finalmente, en la gráfica 3 se observó la comparación entre la respuesta del sistema propuesto (curva verde) y la señal de referencia (línea azul). La curva verde presentó un mayor amortiguamiento y una respuesta más estable, demostrando la eficiencia del control PID aplicado.

En conjunto, la comparación que mostró el sistema ajustado mediante el controlador PID mostró un desempeño más robusto y eficiente, reduciendo oscilaciones y manteniendo la salida en condiciones estables frente a la señal de referencia.

4.6 Diagrama a bloque lazo cerrado

Para el desarrollo del diagrama a bloques, se utilizó en el software de MATLAB.

En la figura 61, se mostró la estructura de la interfaz que ofreció MATLAB para desarrollar el sistema de control PID.

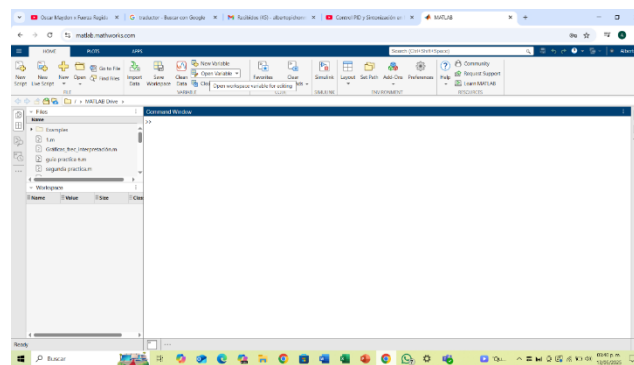


Figura 61. Interfaz de software Matlab.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, junio de 2025.

El software proporcionó dos opciones principales para programar y simular sistemas de control. En este caso, se requirió elaborar un diagrama a bloques, por lo que se hizo uso de la herramienta de simulink, la cual permitió representar gráficamente la estructura del sistema.

En la figura 62, se observó la función de simulink utilizada para la construcción del diagrama a bloques.

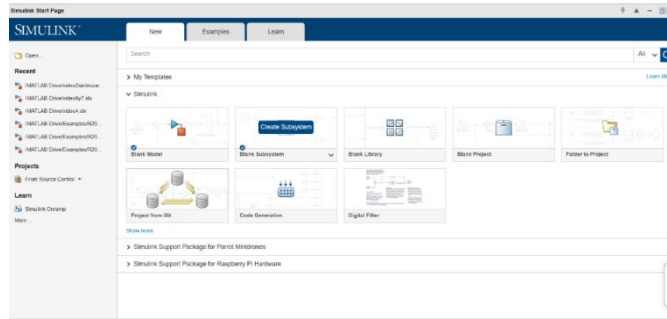


Figura 62. Simulink.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, junio de 2025.

Al encontrarnos en Simulink, se hizo uso de la biblioteca de bloques con el propósito de incorporar todos los componentes necesarios para la construcción del sistema de control. Cada uno de los elementos requeridos, tales como sumadores, bloques de ganancia, función de transferencia, controlador PID y fuentes de referencia fue seleccionado y colocado dentro del espacio de trabajo en MATLAB.

Una vez que los componentes fueron añadidos a la hoja de trabajo, se procedió a realizar la interconexión entre ellos, siguiendo la estructura correspondiente al diagrama de control en lazo cerrado. En la figura 63 se mostró como quedó conformado el diagrama a bloques inicial, donde fue posible visualizar la relación entre cada uno de los elementos del sistema.

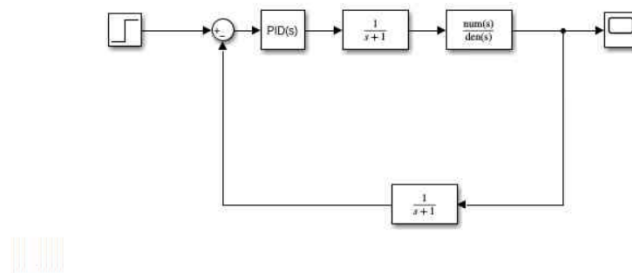


Figura 63. Diagrama a bloque conectado.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, junio de 2025.

Posteriormente, para modificar y asignar la función de transferencia al bloque correspondiente, fue necesario hacer doble clic sobre el mismo. Tal como se ilustró en la figura 64, al abrirse la ventana emergente se permitió editar los parámetros del bloque,

agregando así los valores obtenidos durante el modelado matemático del sistema térmico. Esta configuración fue esencial para representar adecuadamente el comportamiento dinámico.

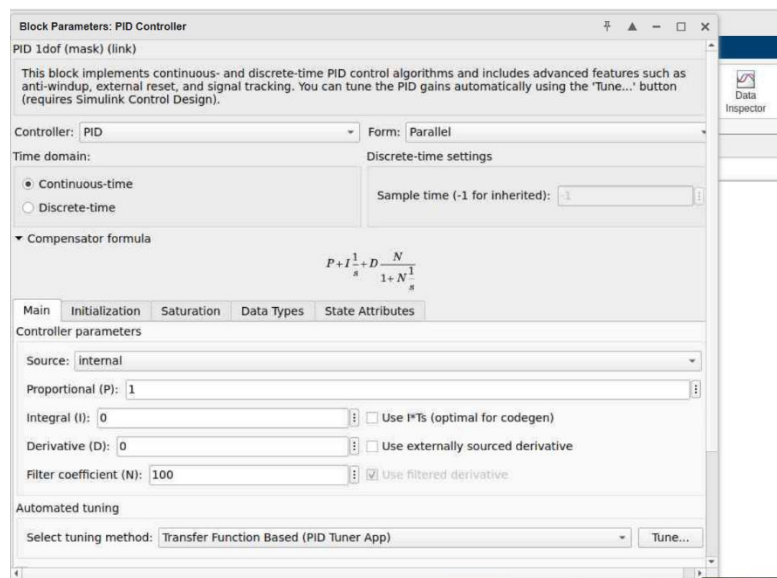


Figura 64. Modificación de valores de bloque.

Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, junio de 2025.

Finalmente, como se evidenció en la figura 65, el sistema completo del diagrama de bloques quedó configurado con todos los parámetros y conexiones establecidos correctamente. El modelo representó el control PID del sistema térmico de lazo cerrado, mostrando la integración entre el proceso, el controlador y la retroalimentación necesaria para mantener la temperatura dentro de los valores deseados.

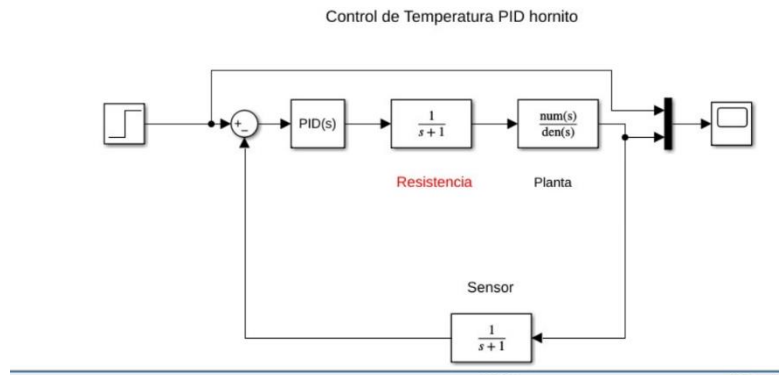


Figura 65. Diagrama a bloque.

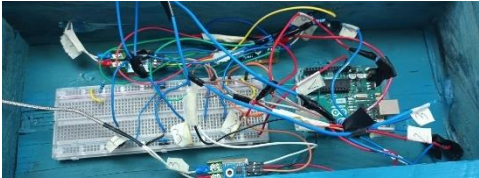
Nota. Fotografía tomada por el autor durante el periodo de residencia profesional, junio de 2025.

De esta manera, se concluyó el desarrollo del diagrama de bloques del controlador PID aplicado al horno de temperatura para semiconductores. El modelo obtenido permitió validar visualmente el funcionamiento del sistema de control, asegurando que la estructura implementada fuera coherente con el diseño teórico y con los requerimientos de estabilidad, precisión y confiabilidad establecidos durante la etapa de caracterización y modelado.

Capítulo V. Resultados.

5.1 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos tras la implementación y montaje final del sistema.

	Figura 1. Muestra la vista general del horno colocado sobre su base metálica, donde se aprecia la manta cerámica instalada en su interior, la cual protege tanto el tubo de cuarzo como la resistencia de calentamiento.
	Figura 2. Se observa la conexión del alambre conductor hacia el dimmer de voltaje; este elemento regula el paso de voltaje y permite controlar la potencia suministrada a la resistencia.
	Figura 3. Presenta la ubicación de los dispositivos dentro de la caja de control, donde se fijan los componentes necesarios para la adquisición de datos de temperatura mediante los termopares y el módulo MAX6675.
	Figura 4. Se realiza una comparación entre la temperatura ambiente y la temperatura registrada por los termopares, cuyos valores se visualizan en el monitor serial del software Arduino.
	Figura 5. Muestra la colocación de los termopares en el tubo de cuarzo, con el objetivo de registrar la temperatura alcanzada en diferentes zonas del horno, permitiendo así un análisis térmico más completo del sistema.

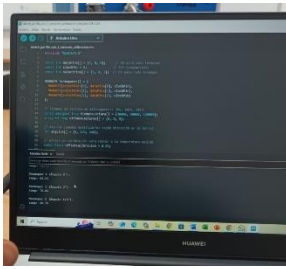


Figura 6. Se visualizan las lecturas obtenidas por cada uno de los tres termopares en el monitor serial del software Arduino, donde se evidencia la respuesta térmica dinámica del sistema durante el proceso de calentamiento.



Figura 7. Además del registro de los termopares, se incluyen imágenes capturadas mediante la cámara termográfica Fluke modelo Ti32, que permiten observar la distribución de temperatura dentro del horno.

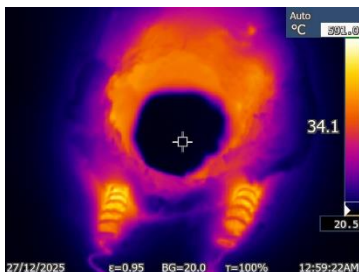


Figura 8. Muestra una visualización obtenida con la misma cámara termográfica Fluke Ti32, donde se registra una temperatura de 591 °C. En esta imagen se aprecia que la resistencia del horno presenta aproximadamente un 90 % de efectividad térmica, reflejada en la distribución uniforme del calor de la imagen captada.

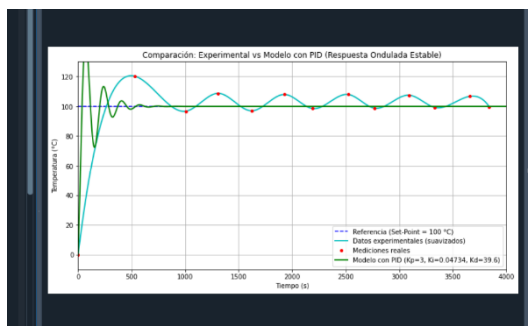


Figura 9. Se presenta el cálculo y diseño del controlador PID para el sistema del horno de temperatura. A través de simulaciones se evalúa su desempeño, demostrando una respuesta más estable, precisa y con menor oscilación en la temperatura del sistema térmico.

Con estos resultados se concluye el presente capítulo. A partir del montaje y la instrumentación realizada, se observa la caracterización térmica mostrada previamente en la gráfica 1 del capítulo IV, correspondiente al análisis experimental de calentamiento.

En general, se concluye que el cálculo previamente realizado para el controlador PID en el horno permite obtener mejoras significativas en la estabilidad, precisión y respuesta del sistema de control de temperatura, optimizando el comportamiento térmico durante el proceso de calentamiento.

Capítulo VI. Conclusiones, Competencias Desarrolladas y Recomendaciones.

6.1 Conclusión

Durante el desarrollo de este proyecto se demostró el compromiso, la dedicación y el esfuerzo requeridos para llevar a cabo la caracterización térmica del horno. Este proceso evidenció la importancia de considerar diversos factores técnicos, tales como la capacidad de corriente que soporta la resistencia y la selección de materiales con un adecuado margen de temperatura, aspectos fundamentales para garantizar un funcionamiento seguro y confiable.

El objetivo principal se cumplió satisfactoriamente mediante la implementación de un programa en Arduino, en conjunto con termopares y el módulo MAX6675, lo que permitió registrar y visualizar en el monitor serial el comportamiento térmico del horno, observando el incremento progresivo de la temperatura. Asimismo, mediante el uso de la cámara termográfica Fluke Ti32, fue posible verificar la distribución del calor en el interior del horno, identificando las zonas de mayor concentración térmica y la uniformidad en la propagación del calor.

Con los datos experimentales obtenidos, se desarrolló el modelo dinámico del sistema térmico y se efectuó el diseño teórico del controlador PID mediante el método de Ziegler – Nichols, logrando mejorar la respuesta del sistema, principalmente en el tiempo de asentamiento y en la reducción del error en estado estacionario.

Entre los principales logros alcanzados de este proyecto se destacan:

Selección de materiales: Se evaluaron y seleccionaron los componentes adecuados para determinar su viabilidad para un correcto funcionamiento.

Simulación de circuito: Se validó el circuito mediante el software Proteus, antes de su implementación física, así reduciendo riesgo y asegurando su operatividad.

Montaje del sistema: Se llevó a cabo un ensamblaje estructurado y la simulación realizada, asegurando la correcta interconexión de los componentes.

Tiempo de operación: Se determinó el intervalo de requerimiento para alcanzar la temperatura deseada, observando la dinámica de calentamiento del horno.

Aunque el controlador PID no se implementó de manera física, su análisis teórico y simulación demostraron que su futura aplicación en el horno permitirá optimizar la estabilidad, precisión y eficiencia energética del proceso térmico, aspectos esenciales en los tratamientos aplicados a materiales semiconductores.

En conclusión, la caracterización térmica del horno constituye un aporte significativo, ya que proporciona una comprensión clara e integral de su funcionamiento, su tiempo de respuesta y su estabilidad térmica. Estos resultados permitirán optimizar futuros procesos de operación, mantener una temperatura controlada y asegurar la calidad en el desempeño del horno. Esto permitirá garantizar la estabilidad de la temperatura y asegurar una mayor calidad en el desempeño del sistema.

6.2 Recomendaciones

1. Se hizo uso de dos resistencias de diferentes aleaciones, la primera aleación fue de FeCrAL (aleación hierro-cromo-aluminio) esta aleación es muy estable, lo que nos permite una mejor resistencia de oxidación y mayor vida al elemento de alta temperatura.

Mientras que la segunda aleación Ni-Cr, se protege bien, solo que soporta temperaturas altas, pero mantiene mejor su integridad así ofreciéndonos mayor vida útil.

La aleación de FeCrAL es utilizada principalmente para hornos, mientras que la segunda aleación Ni-Cr, es utilizada para calefactores domésticos, y poco uso a hornos.

Por lo que ambas resistencias son buenas nomas que en una aleación aguanta más temperatura alta que la otra.

2. Una de las recomendaciones que me dio la Dra. Raquel Ramírez Amador, que tengo que reducir el marco teórico.

3. Me han dado la recomendación que verifique la investigación que tenga coherencia.

6.3 Competencias desarrolladas

Durante mi periodo de residencias profesionales, tuve la oportunidad de conocer, reforzar y aprender acerca de los hornos tipo mufla que debe tener una resistencia eléctrica colocada uniformemente en el horno al igual debe contener un buen control de temperatura, ya que la temperatura es la principal ya que eso va relacionado con la creación, deposito, oxidación a los semiconductores, este aprendizaje hizo que contribuyera significativamente en mi ámbito profesional.

Por lo que describiré las tareas que desempeñe durante este tiempo:

1.- Factor de resistencia: Tener bien en cuenta, de cuando puede aguantar una resistencia en temperatura sin saber de esto podemos quemarla.

2.- Termopar tipo K y modulo MAX 6675: Estos componentes no los conocía, pero es muy importante el termopar tipo k y que puede aguantar temperatura de 1024°C y haciendo uso del módulo MAX6675 nos puede dar la señal de manera digital.

3.- Simulación: se debe hacer una simulación de los componentes a utilizar en el software de electrónica Proteus, así para poder verificar si los componentes son aptos para que pueda funcionar de una manera eficiente.

4.- Pruebas: verificar que los cables estén conectados adecuadamente, ya que con la temperatura que se genera, el alambre puede degradarse y así generar un corto circuito.

De acuerdo en ello una de las responsabilidades que pude asumir durante este periodo fue lo siguiente:

Honestidad.

Uso estadístico del componente.

Habilidad.

Trabajo.

Responsabilidad.

Liderazgo.

Capítulo VII. Bibliográficas.

Referencias

Referencias

- (s.f.), O. E. (02 de Mayo de 2025). *Termopar: Tipos y aplicaciones*. Obtenido de OMEGA Engineering México: <https://mx.omega.com/prodinfo/termopar.html>
- ¿Qué es un horno de Nitrógeno? Esencial Para Procesos. (21 de Octubre de 2024). Obtenido de ¿Qué es un horno de Nitrógeno? Esencial Para Procesos: <https://es.kindle-tech.com/faqs/what-is-a-nitrogen-oven>
- Alviz, B. E. (2022). Diseño e implementacion de un módulo educativo para el control e temperatura, empleando controladores PI, PID y predictor de Smith. Perú, Arequipa, Arequipa. Obtenido de <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1e68fd5a-38bd-4393-a765-ffeaa94df83c/content>
- Balderas, Z. J. (13 de septiembre de 2007). *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*. Obtenido de Revista Ingeniería UADY: https://www.repositoriodigital.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/10980/1/automatizacion_del_control.pdf
- Bastidas, O. J. (septiembre de 1985). *Repositorio Institucional UAO*. Obtenido de Universidad Autonoma de Occidente (UAO): <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/3977e9a6-b118-48fa-becc-4ca0e0d660e0/content>
- Bernardo, C. P., Ricardo, A. M., & Cunha, J. P. (2014). *Enlace de naturaleza de Springer*. Obtenido de Enlace de naturaleza de Springer: https://link-springer-com.translate.goog/article/10.1007/s42452-024-06001-1?error=cookies_not_supported&code=38aaebe1-b754-4ab2-9fd8-c18ee829f6b0&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Bolton, W. (1998). *Ingenieria de Control*. Londres, Reino Unido: Longman.
- Castell, C. (02 de Abril de 2015). *Qué son y cuáles son las funciones de los jumpers en una motherboard*. Obtenido de Profesional Review: <https://www.profesionalreview.com/2015/04/02/que-son-y-cuales-son-las-funciones-de-los-jumpers-en-una-motherboard/>
- Catarina P, C. V., Marques, L. R., De melo, C. J., & Torres, J. P. (08 de Junio de 2024). *Discover Applied Sciences*. Obtenido de Discover Applied Sciences: https://link-springer-com.translate.goog/article/10.1007/s42452-024-06001-1?error=cookies_not_supported&code=38aaebe1-b754-4ab2-9fd8-c18ee829f6b0&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- CEIV. (28 de Abril de 2025). *Termopar tipo J*. Obtenido de CEIV: <https://ceiv.com.mx/termopar-tipo-j/>

- CEIV. (02 de Mayo de 2025). *Termopar Tipo T*. Obtenido de CEIV:
<https://ceiv.com.mx/termopar-tipo-t/>
- Clemente, d. I. (s.f.). *SildeShare*. Obtenido de SildeShare:
<https://es.slideshare.net/slideshow/aplicacion-difusion-semiconductores/76638282>
- Control, M. y. (02 de Mayo de 2025). *Termocupla tipo K*. Obtenido de Medicion y Control: <https://medicionycontrol.com.co/termocupla-tipo-k/>
- Domínguez, J. (2009). *Manual Técnico de instalaciones eléctricas en baja tensión*. Xalapa, Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Francis, H. (1981). *Ingenieria termodinámica*. México: C.E.C.S.A.
- GmbH, C. T. (s.f.). *KLLCOMPZ - Crystal Lock Components*. Obtenido de KLLCOMPZ - Crystal Lock Components: <https://www.crystec.com/kllcompz.htm>
- GmbH, C. T. (s.f.). *KLLCOMPZ - Crystal Lock Components*. Obtenido de KLLCOMPZ - Crystal Lock Components: <https://www.crystec.com/klldiffz.htm>
- Guichelaar, P. (1933). *Acheson Process*. Paises bajos: Elsevier.
- Haeting Up Innovation in the Semiconductor Processing Furnace Market*. (27 de Julio de 2025). Obtenido de <https://www.marketresearchintellect.com/es/blog/heating-up-innovation-in-the-semiconductor-processing-furnace-market/>
- Hernández, C. F. (2008). Caracterización de procesos de grabado seco de materiales para la fabricacion de dispositivos CMOS. México, Puebla , Puebla .
- Hernández, R. H. (2001). *Diseño y construccion de un horno electrico para la fundición de metales*. Obtenido de Diseño y construccion de un horno electrico para la fundición de metales.:
<https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/pd2001/289827/289827.pdf>
- Hernández, W. (2007). *Repositorio de la Universidad Tecnologica de Pereira*. Obtenido de Repositorio de la Universidad Tecnologica de Pereira:
<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/ee6c9f0f-25b8-4ada-a87d-47e465ba27d1/content>
- ISOPARTNER. (03 de Junio de 2025). *La fibra de vidrio: caracteísticas y formas de uso*. Obtenido de ISOPARTNER España:
<https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/21f7c75a-2322-44d2-a559-6cb8d94765e9/content>
- ITApizaco, & INSTITUCIONAL, P. I. (2012). *Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco*. Obtenido de Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco:
https://www.apizaco.tecnm.mx/wp-content/uploads/2025/01/TecNM-ITApizaco_PoliticaGestionInst.pdf

- ITApizaco, & Reseña, H. (2012). Obtenido de <https://www.apizaco.tecnm.mx/historia/>
- ITApizaco, & Visión, M. y. (2012). *Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco*. Obtenido de Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco: <https://www.apizaco.tecnm.mx/misionvision/>
- ITApizaco, P. D. (2012). *Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco*. Obtenido de Tecnológico Nacional de México Campus Apizaco.
- Kindle., T. (12 de abril de 2025). *What Is Chemical Bath Deposition*. Obtenido de Kindle-Tech: https://es.kindle-tech.com/faqs/what-is-chemical-bath-deposition-also-called#:~:text=Descripci%C3%B3n%20general%20del%20proceso%20*%20La%20CBD,adecuado%20para%20sustratos%20sensibles%20a%20la%20temperatura.
- Koops. (18 de Mayo de 2025). *Calentamiento por resistencia*. Obtenido de Koops: <https://es.koops.com/capabilities/resistance-heating/#:~:text=El%20calentamiento%20por%20resistencia%20es,a%20trav%C3%A9s%20de%20la%20conducci%C3%B3n.>
- Logicbus. (02 de Mayo de 2025). *¿Qué es un termopar?* Obtenido de Logicbus: <https://www.logicbus.com.mx/blog/que-es-termopar/>
- Malviya, S., Patidar, K., Gupta, A., & Mittal, D. (01 de Diciembre de 2016). *IJSART - International Journal For Scientific Research & Development*. Obtenido de IJSART - International Journal For Scientific Research & Development: https://ijsart.com/public/storage/paper/pdf/IJSARTV2I128148.PDF?utm_source=chatgpt.com
- Martil, I. (Sin fecha). *La historia de la electronica antes del transistor*. Obtenido de <https://alblatecno.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/05/la-historia-de-la-electronica.pdf>
- Mechatronics, N. (13 de Mayo de 2025). *Transmisor MAX6675*. Obtenido de Naylamp Mechatronics: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/331-transmisor-max6675-para-termocupla-k.html>
- Merlin, L. (18 de Septiembre de 2024). *Tipos de destornilladores y usos*. Obtenido de Leroy Merlin: <https://www.leroymerlin.es/ideas-y-consejos/consejos/tipos-de-destornilladores-y-usos.html#:~:text=Los%20destornilladores%20son%20las%20herramientas,hasta%20casi%20cualquier%20reparaci%C3%B3n%20dom%C3%A9stica.>
- Monteros, L. A. (2015). *Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte (UTN)*. Obtenido de repositorio.utn.edu.ec: <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/4592/1/04%20MEC%20077%20Tesis.pdf>

- Novelli, F. L. (2023). *Estudio de la oxidacion Del silicio poroso y su relacion con la conductividad electrica Transversal*. Madrid: Universidad Europea de Madrid.
- Ocampo, H. J., Iván, V. Á., Alducin, C. J., & Molinar, S. J. (2023). *Los semiconductores, el control automatico y el procesamiento de señales en los automoviles actuales*. Obtenido de Los semiconductores, el control automatico y el procesamiento de señales en los automoviles actuales:
https://azcatl.azc.uam.mx/index.php/azcatl/article/view/ocampo_semicondutores/ocampo_semicondutores
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Mexico: Pearson Educación.
- PACK, N. (25 de Junio de 2020). *Caja de madera: usos y beneficios para embalaje*. Obtenido de NASA PACK: <https://www.nasapack.com/cajas-de-madera-beneficios/>
- Ramos, A. M. (2012). *Principis de electrónica* . México: Red Tercer Milenio S.C.
- Rayo, L. G. (2001). *Control de temperatura para un horno industrial de secado utilizando un control PID analógico*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería.
- Semicorex. (25 de Septiembre de 2024). Obtenido de Semicorex:
<https://es.semicorex.com/news-show-7698.html>
- Semicorex Advanced Material Technology Co., I. (11 de Septiembre de 2024). *Oxidación en el procesamiento de semiconductores*. Obtenido de SEMICOREX:
<https://es.semicorex.com/news-show-7690.html>
- Servicios Condumex, S. d. (2009). *Manual técnico de instalaciones eléctricas en baja tensión*. México: Servicios Condumex.
- SHANNON, S. (13 de Octubre de 2025). *sdsindustries*. Obtenido de Blog TAP IN :
<https://www.kilncontrol.com/blog/history-of-kilns/#:~:text=La%20historia%20temprana%20de%20los%20hornos:%208000%20%E2%80%93%206000%20a.&text=Los%20primeros%20hornos%20datan%20de,cer%C3%A1mica%20cocida%20sol%C3%ADa%20ser%20fr%C3%A1gil.>
- Tc Medida y Control de Temperatura, S. (2 de Mayo de 2025). *Termopar Tipo E - Información Técnica*. Obtenido de TC Medida y Control de Tmeperatura, S.A.:
<https://www.tc-sa.es/termopares/tipo-e-termopar.html>
- TC Medida y Control de Temperatura, S. (02 de Mayo de 2025). *Termopar tipo S - Información Técnica*. Obtenido de TC Medida y Control de Temperatura, S.A.:
<https://www.tc-sa.es/termopares/tipo-s-termopar.html>
- Tempress, F. R. (01 de Enero de 2004). Obtenido de Universidad de arizona, centro de Nanofabricacion : https://mfc.arizona.edu/sites/default/files/2022-02/m320_01_furnace.pdf

Torrente, A. O. (2013). *Arduino: Curso práctico de información*. México: Alfaomega Grupo Editor.

Anexos

A) Caracterización del horno para tubo HT2-1100



1.- Principio del Funcionamiento

Al hacer uso de la resistencia, esta debió estar energizada por electricidad. La electricidad pasó por un conductor, el cual el conductor permitió el flujo de corriente eléctrica, donde parte de la energía cinética de los electrones se transformó en calor debido al choque que sufren los electrones con las moléculas del conductor.

La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica dependió directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo durante el cual circuló por el conductor y de la resistencia que el mismo opuso al paso de la corriente (Francis, 1981). Matemáticamente, esto se expresó mediante la siguiente fórmula:

$$Q = I^2 * R * t \quad (1)$$

Donde:

Q = Es la energía calorífica producida por la corriente expresada en Joules.

I = Intensidad de la corriente que circula por el conductor en Amperes.

R = Resistencia eléctrica del conductor expresada en ohm.

T = Tiempo en segundos.

A continuación, se realizó el cálculo del área del horno. Se recordó que, en la fase previa del diseño del horno, se explicó que este contaba con un orificio de 5.5 cm de diámetro, en cuyo interior se instaló una resistencia eléctrica de calentamiento. Al poner en funcionamiento dicha resistencia, esta pudo calentar al tubo de cuarzo que se colocó en el orificio situado.

Para llevar a cabo esto de manera eficiente, se consideró que la conducción es el mecanismo de transferencia de calor en el que la energía térmica se transfirió de un punto a otro mediante la interacción de los átomos y moléculas de la materia a través del conductor.

Se tomó en cuenta el área del horno utilizando la siguiente fórmula:

Dado que el horno tenía forma rectangular, se empleó la fórmula del área para un rectángulo:

$$A = B * H \quad (2)$$

$$A = (0.50m)(0.225m)(6)$$

$$A_{total} = 0.675 m^2$$

Por lo que el área del horno es de $0.675 m^2$.

Asimismo, se consideró el volumen del cilindro correspondiente al orificio central, anteriormente descrito, y para este cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

Fórmula del volumen del cilindro:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (3)$$

Datos:

Diámetro 5.5 cm con un radio de 2.5 cm = 0.025 m.

Y una longitud = 50 cm = 0.50 m.

Despejamos:

$$V = \pi \cdot (0.025)^2 \cdot 0.50$$

$$V = 9.81747704 \times 10^{-2}$$

El cilindro presentó un volumen de 9.81747704 m^3 .

Contando ya con el área que fue de 0.675 m^2 , se procedió a calcular la resistencia térmica empleando la fórmula correspondiente:

$$R_T = \frac{L1}{K1A} + \frac{L2}{K2A} + \frac{L3}{K3A} \quad (4)$$

L1, L2, L3 = 1" = 0.0254 m.

1" = Es el espesor de cada pared.

K = Conductividades térmicas.

K1 = 1.05 W/mK

K2 = 0.07 W/mK

K3 = 0.3 W/mK

A = 0.675 m^2

Sustituimos valores de la anterior ecuación:

$$R_T = \frac{L1}{K1A} + \frac{L2}{K2A} + \frac{L3}{K3A}$$
$$R_T = \frac{0.0254m}{1.05W/mK(0.675m^2)} + \frac{0.0254m}{0.07W/mK(0.675m^2)} + \frac{0.0254m}{0.3W/mK(0.675m^2)}$$

$$R_T = 0.035837Kw + 0.537566Kw + 0.125432Kw$$

$$R_T = 0.698835K/w$$

Por lo que la resistencia térmica será de 0.698835 K/w.

Ahora con la siguiente fórmula que se muestra, se obtendrá la potencia que se necesitará para disipar las resistencias eléctricas para obtener la temperatura deseada.

$$Q = \frac{\Delta T}{RT} \quad (4)$$

Donde:

ΔT = Diferencia de temperatura entre dos puntos.

RT = Resistencia total.

Por lo que, tendremos una temperatura interior de 700 °C y la temperatura exterior del clima.

$$T_{int} = 1000^{\circ}C \text{ (1273.15K)}$$

$$T_{ext} = 25^{\circ}C \text{ (298K)}$$

$$R_T = 0.698835K/w$$

$$q = \frac{1273.15 - 298K}{0.698835K/w}$$

$$q = 1395.393W$$

Se recordó que el voltaje es la diferencia de potencial entre los conductores. Para poder definir la corriente se usa de la fórmula de la ley de ohm, la cual establece la relación entre voltaje, corriente y resistencia en un circuito eléctrico.

La Ley de Ohm indicó que la corriente es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia del circuito. (Servicios Condumex, 2009). Matemáticamente, se expresó como:

$$V = I \cdot R \quad (5)$$

El circuito será alimentado con 120 V, entonces: $I = 1395.393W / 120 V = 11.62$ Amperes
Con el valor de la corriente obtendremos el valor de la resistencia con:

$$R = V / I = 120 / 11.62 = 10.327\Omega$$

Para este horno se utilizó el tipo de material especial para hornos de altas temperaturas llamado Nicromo, el cual es una aleación de níquel- cromo.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, haremos uso de una resistencia eléctrica de calentamiento, el cual es una resistencia de 11.62 ohmios.

Debemos tener claro que el Voltaje es la diferencia de potencial entre los conductores. Para poder definir la corriente se usa de la fórmula de la ley de ohm, que establece la relación entre el voltaje, la corriente y la resistencia en un circuito eléctrico.

Posteriormente, haremos uso de la ley de watt, que establece que la potencia consumida por una carga es directamente proporcional al voltaje suministrado y a la corriente que circula por el circuito (Domínguez, 2009). Matemáticamente se expresó como:

$$P: V.I \quad (6)$$

Donde:

P: Potencia (Watts)

V: Voltaje (V)

I: Corriente (A)

La potencia se calculó de la siguiente manera:

$$P: 127V. 11.62A = 1475.74 \text{ Watts}$$

Por lo tanto, el circuito consumió 1475.74 *Watts*.

Para este horno utilizó el material especializado para altas temperaturas, en este caso una aleación Níquel – Cromo (Ni-Cr), la cual ofreció una alta resistencia al calor y una mayor vida útil, debido a que mantuvo su integridad estructural aun en condiciones térmicas elevadas.

Como se mencionó anteriormente, se empleó una resistencia de aleación Níquel-Cromo de calibre 18.

Diámetro del alambre (AWG 18): $D = 1.080 \text{ mm}$.

Radio: $r = 0.540 \text{ mm} - 0.000540 \text{ m}$.

Resistividad de (20°C): $\rho = 1.77 \times 10^{-6} \Omega.m$

Factor de temperatura de trabajo: $C_t: 1.045$

Con esta información, se procedió al cálculo del área de la sección transversal del alambre:

$$A = \pi r^2 \quad (7)$$

$$A = \pi(0.000540m)^2$$

$$A = 9.16088 \times 10^{-7} m^2$$

Resistencia eléctrica a 20 °C.

Este dato resulto importante, ya que permitió conocer la resistencia por metro que existe en el nicromo.

$$R_{20} = \frac{\rho * L}{A} \quad (8)$$

Donde:

ρ = Resistividad.

L = Longitud.

A = Área de sección transversal.

Sustituimos valores:

$$R_{20} = \frac{1.77 \times 10^{-6} \Omega \cdot m * 1m}{9.16088 \times 10^{-7} m^2}$$

Obtenemos el resultado:

$$R_{20} = 1.932 \Omega$$

De esta manera, se determinó que por cada metro existieron 1.932 Ω .

La resistencia eléctrica de trabajo se calculó mediante el coeficiente de resistividad, ya que este coeficiente de resistividad permitió conocer el cambio de resistencia debido a los cambios de temperatura. El valor del coeficiente para el nicromo a 1100 °C fue de 1.045, quedando el cálculo de la siguiente manera:

$$R_t = C_t * R_{20} \quad (9)$$

$$R_t = 1.045 * 1.932 \Omega$$

$$R_t = 2.018 \Omega$$

Con este resultado se determinó que la resistencia eléctrica a la temperatura de trabajo cambió a 2.018 Ω por metro.

Finalmente, con el valor obtenido de 11.62 Ω para la resistencia total del horno y el valor de 2.018 Ω por metro correspondiente a la resistencia de trabajo, fue posible calcular la cantidad de material necesaria para poder hacer uso de la resistencia:

$$L = \frac{R}{R_T} \quad (10)$$

De esta forma obtenemos:

$$L = \frac{11.62 \Omega}{2.018 \Omega/m}$$

$$L = 5.75 m$$

2.- Caracterización Experimental de Calentamiento

El procedimiento experimental consistió en elevar progresivamente la temperatura del horno desde 200 °C hasta 1000 °C, registrando los valores de temperatura máxima y mínima, así como los tiempos de subida y bajada. Las mediciones se realizaron con un cronómetro digital, promediando seis lecturas por cada punto de temperatura con el fin de garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los datos.

Finalmente, se presentan los datos experimentales obtenidos para cada temperatura. Cada tabla incluyó los valores de subida y bajada de la temperatura, junto con el tiempo requerido para alcanzar dichos valores. La información completa se anexó desde la tabla 1 hasta la tabla 8.

Temperatura deseada a alcanzar:
200°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4
Subida	Tmax: 216.8	Tmax: 201.8	Tmax: 202.0	Tmax: 202.2
Tiempo	Tiempo: 2:34	Tiempo: 56s	Tiempo: 47s	Tiempo: 47s
Bajada	Tmin: 199.4	Tmin: 199.4	Tmin: 199.4	Tmin: 199.4
Tiempo	Tiempo: 4:36	Tiempo: 44s	Tiempo: 1:00	Tiempo: 59s

Tabla 1. Temperatura de 100 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
300°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4
Subida	Tmax: 314.1	Tmax: 302.5	Tmax: 302.1	Tmax: 302.4
Tiempo	Tiempo: 3:11	Tiempo: 1:00	Tiempo: 52s	Tiempo: 52s
Bajada	Tmin: 299.2	Tmin: 299.3	Tmin: 299.2	Tmin: 299.4
Tiempo	Tiempo: 3:00	Tiempo: 1:00	Tiempo: 48s	Tiempo: 1:00

Tabla 2. Temperatura de 300 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
400°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4
Subida	Tmax: 412.1	Tmax: 403.4	Tmax: 403.1	Tmax: 402.9
Tiempo	Tiempo: 3:30	Tiempo: 47s	Tiempo: 47s	Tiempo: 48s
Bajada	Tmin: 398.6	Tmin: 398.8	Tmin: 398.8	Tmin: 398.8
Tiempo	Tiempo: 2:10	Tiempo: 1:05	Tiempo: 1:10	Tiempo: 57s

Tabla 3. Temperatura de 400 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
600°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4
Subida	Tmax: 607.4	Tmax: 603.3	Tmax: 603.0	Tmax: 602.9
Tiempo	Tiempo: 6:28	Tiempo: 45s	Tiempo: 45s	Tiempo: 41s
Bajada	Tmin: 597.5	Tmin: 597.9	Tmin: 598	Tmin: 598.1
Tiempo	Tiempo: 1:10	Tiempo: 55s	Tiempo: 52s	Tiempo: 51s

Tabla 4. Temperatura de 600 °C.

Nota: a partir de esta temperatura el horno se empezó a poner rojo en la caratula interior.

Temperatura deseada a alcanzar:
700°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4		
Subida	Tmax: 705.4	Tmax: 702.6	Tmax: 702.4	Tmax: 702.3	Tmax: 702.4	Tmax: 702.2

Tiempo	Tiempo: 4:19	Tiempo: 0:41	Tiempo: 0:33s	Tiempo: 0:37s	Tiempo: 0:32s	Tiempo: 0:34s
Bajada	Tmin: 696.8	Tmin: 697.7	Tmin: 697.5	Tmin: 697.6	Tmin: 697.7	Tmin: 697.6
Tiempo	Tiempo: 0:51s	Tiempo: 0:44 s	Tiempo: 0:38s	Tiempo: 0:44s	Tiempo: 0:40s	Tiempo: 0:37s

Tabla 5. Temperatura de 700 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
800°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4		
Subida	Tmax: 803.4	Tmax: 801.8	Tmax: 801.5	Tmax: 801.6	Tmax: 801.5	Tmax: 801.5
Tiempo	Tiempo: 4:31	Tiempo: 0:40s	Tiempo: 0:33s	Tiempo: 0:30s	Tiempo: 0:29s	Tiempo: 0:32s
Bajada	Tmin: 796.6	Tmin: 797.3	Tmin: 797.4	Tmin: 797.3	Tmin: 797.6	Tmin: 797.4
Tiempo	Tiempo: 0:39s	Tiempo: 0:35s	Tiempo: 0:30s	Tiempo: 0:57s	Tiempo: 0:36	Tiempo: 0:35s

Tabla 6. Temperatura de 800 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
900°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4		
Subida	Tmax: 901.8	Tmax: 901.2	Tmax: 901	Tmax: 900.8	Tmax: 900.9	Tmax: 900.9
Tiempo			Tiempo: 0:36s			

	Tiempo: 5:17	Tiempo: 0:41		Tiempo: 0:35s	Tiempo: 0:29s	Tiempo: 0:33s
Bajada	Tmin: 896.5	Tmin: 896.8	Tmin: 897.1	Tmin: 897.3	Tmin: 897.0	Tmin: 897.1
Tiempo	Tiempo: 0:33s	Tiempo: 0:34s	Tiempo: 0:28s	Tiempo: 0:30s	Tiempo: 0:34s	Tiempo: 0:32s

Tabla 7. Temperatura de 900 °C.

Temperatura deseada a alcanzar: 1000°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4		
Subida	Tmax:100 1	Tmax: 1000	Tmax: 1000	Tmax: 1000	Tmax: 1000	Tmax: 1000
Tiempo	Tiempo: 7:01	Tiempo: 0:41s	Tiempo: 0:37s	Tiempo: 0:33s	Tiempo: 0:36s	Tiempo: 0:39s
Bajada	Tmin: 996.4	Tmin: 996.8	Tmin: 996.8	Tmin: 997	Tmin: 997	Tmin: 996.9
Tiempo	Tiempo: 0:33s	Tiempo: 0:26s	Tiempo: 0:30s	Tiempo: 0:28s	Tiempo: 0:24s	Tiempo: 0:27s

Tabla 8. Temperatura de 1000 °C.

El comportamiento general mostro un incremento progresivo de la velocidad de respuesta del sistema conforme la temperatura aumentaba, evidenciando una reducción en el tiempo de asentamiento y un mayor factor de amortiguamiento.

3.- Calculo de parámetros dinámicos

Obtenidos los datos experimentales, se calcularon los parámetros característicos de un sistema de segundo orden: porcentaje de sobreelongación (M_p), factor de amortiguamiento relativo (ξ), frecuencia natural amortiguada (ω_d), frecuencia natural no amortiguada (ω_n), sigma (σ), y los tiempos de asentamiento al 2% y al 5%.

Los cálculos se llevaron a cabo en la aplicación excel, aplicando las fórmulas correspondientes. A continuación, se muestran las figuras de los resultados obtenidos.

Temperatura Máxima	Temperatura Deseada Alcanzar	Porcentaje	Fórmula	Porcentaje	Resultado de Porcentaje
216.8	200	100		8.4	0.084
314.1	300	100		4.7	0.047
412.1	400	100	$M_{p=\frac{C(T_p)-C(\infty)}{C(\infty)} \cdot 100}$	3.025	0.03025
607.4	600	100		1.233333333	0.012333333
705.5	700	100		0.785714286	0.007857143
803.4	800	100		0.425	0.00425
901.8	900	100		0.2	0.002
1001	1000	100		0.1	0.001

Figura 1. Valores de sobre elongación máxima.

En la figura 1 se observó la relación entre la temperatura deseada y el porcentaje de la sobreelongación máxima. Los valores obtenidos permitieron identificar el nivel de sobrepaso del sistema en cada punto de temperatura.

Formula de amortiguamiento ξ	Resultado de ξ
$\xi = \frac{\sqrt{(\ln(Mp)^2)}}{\pi^2 + (\ln(Mp)^2)}$	0.61914
	0.69746
	0.74402
	0.81356
	0.83912
	0.86680
	0.89245
	0.91028

Figura 2. Valores de factor de amortiguamiento.

La figura 2 presentó los valores calculados del factor de amortiguamiento relativo, obtenidos a partir de MP. Se apreció un incremento del amortiguamiento conforme aumenta la temperatura, lo que indica un comportamiento más estable.

Formula de omega Wd	Resultado Wd
$W_d = \frac{\pi}{T_p}$	0.02040
	0.01645
	0.01496
	0.00810
	0.01213
	0.01159
	0.00991
	0.00746

Figura 3. Valores de omega D “WD”.

Formula frecuencia Natural Wn	Resultado Wn
$W_n = \frac{W_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$	0.025978
	0.022952
	0.022390
	0.013925
	0.022299
	0.023247
	0.021967
	0.018025

Figura 4. Valores de frecuencia natural Wn.

Las figuras 3 y 4 mostraron las frecuencias naturales amortiguadas y no amortiguadas del sistema, las cuales reflejaron la velocidad con la que esté sistema respondió ante variaciones térmicas.

Formula	Resultado σ
$\sigma = \xi(W_n)$	0.016084
	0.016008
	0.016658
	0.011328
	0.018712
	0.020151
	0.019604
	0.016408

Figura 5. Valores de sigma.

La figura 6 mostró los valores de sigma, relacionados con la rapidez con la que el sistema alcanzó el estado estable.

Fórmula tiempo de asentamiento 2%	Resultado de Ts	Minutos
$T_s = \frac{4}{\sigma}$	248.6941	4.14
	249.8686	4.16
	240.1194	4.00
	353.0924	3.40
	213.7699	3.56
	198.5044	3.31
	204.0354	3.40
	243.7840	4.06

Figura 6. Valores de tiempo de asentamiento 2%.

	Formula tiempo de asentamiento 5%	Resultado de Ts	Minutos
	$T_s = \frac{3}{\sigma}$	186.5206	3.11
		187.4014	3.12
		180.0896	3.00
		264.8193	3.18
		160.3274	2.67
		148.8783	2.48
		153.0265	2.55
		182.8380	3.05

Figura 7. Valores de tiempo de asentamiento 5%.

En las figuras 6 y 7 se presentaron los tiempos de asentamiento al 2% y al 5%. Se observó que, el tiempo de asentamiento disminuyó, evidenciando un comportamiento más rápido.

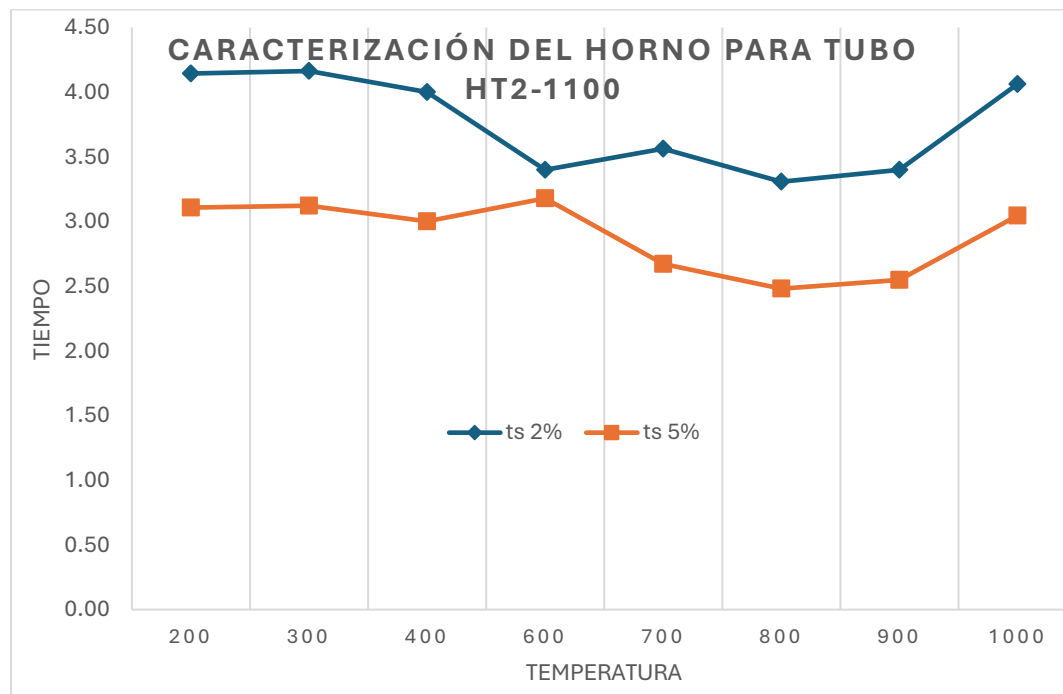
Con los resultados de tiempo de asentamiento se generó la gráfica 1, donde la línea azul representó al 2 % y la línea naranja el asentamiento al 5 %.

Esta gráfica fue obtenida mediante la aplicación de excel; en el eje X se mostró la temperatura, y en el eje Y el tiempo correspondiente.

En la línea azul está representando el tiempo de asentamiento del 2%.

La línea naranja está representando el tiempo de asentamiento del 5%.

La caracterización presentada abarco el rango de 200 °C a 1000 °C de temperatura.



Gráfica 1. Tiempo de asentamiento de 2% y 5%.

4.- Modelado del sistema de segundo orden para control

Se tuvo en cuenta la existencia de dos tipos de control: de lazo abierto y lazo cerrado. En este caso, se empleó un sistema de lazo cerrado.

La principal diferencia entre ambos sistemas radica en el monitoreo continuo de la variable que se desea controlar. Un sistema de lazo abierto no conoce el comportamiento de la variable de salida; es decir, no realiza ninguna corrección con la base en dicha salida. Por el contrario, un sistema de lazo cerrado monitorea constantemente la variable de salida, comparándola con una señal de referencia para evaluar su evolución y corregir cualquier desviación (Bolton, 1998). Este principio permitió al sistema de lazo cerrado ajustara su comportamiento en tiempo real, con el objetivo de mantener la temperatura del horno, dentro de los valores deseados.

A partir de los parámetros calculados, se determinó el modelo matemático de segundo orden del sistema térmico. Para una entrada de impulso unitario $r(t)$, su transformada de Laplace correspondiente es la unidad, o $R(s) = 1$. La respuesta de impulso unitario $C(s)$ del sistema del segundo orden (Ogata, 2010), matemáticamente se expresa de la siguiente manera.

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (13)$$

Donde:

ξ = Factor de amortiguamiento relativo.

ω_n = Frecuencia natural.

S = Impulso del sistema.

Una vez obtenidos los valores calculados previamente, se sustituyeron en la ecuación, quedando expresado el modelo matemático del sistema de la siguiente manera:

$$C(s) = \frac{(0.025978)^2}{s^2 + 2(0.61914)(0.025978)s + (0.025978)^2}$$

Los valores sustituidos en la fórmula de arriba fueron valores calculados con ayuda de la figura 2 del punto A, de anexos.

Se sustituyeron los valores, con los cuales se obtuvo la respuesta a un impulso del sistema de segundo orden.

$$G(s) = \frac{0.000674856}{s^2 + 0.03216803s + 0.000674856}$$

Mediante esta ecuación se identificó el comportamiento dinámico del horno. El análisis reveló que el sistema se comportó como un sistema subamortiguado, con una respuesta rápida y una estabilidad térmica dentro de los márgenes de operación.

5.- Control PID

Con el modelo validado, se aplicó el segundo método de Ziegler – Nichols para la sintonización del controlador PID. Mediante este método fue posible determinar las ganancias con la siguiente tabla 9, que se presentó a continuación:

Controlador	Kp	Ti	Td
P	0.5Ku	∞	0
PI	0.45Ku	1/1.2Pu	0
PID	0-6Ku	0.5Pu	0.125Pu

Tabla 9: Método Ziegler - Nichols

Donde:

P = Es el controlador Proporcional.

PI = Es el controlador proporcional-integral.

PID = Es el controlador Proporcional-Integral-Derivativo.

Ku = Ganancia critica del sistema.

Pu = Oscilación sostenida de periodo.

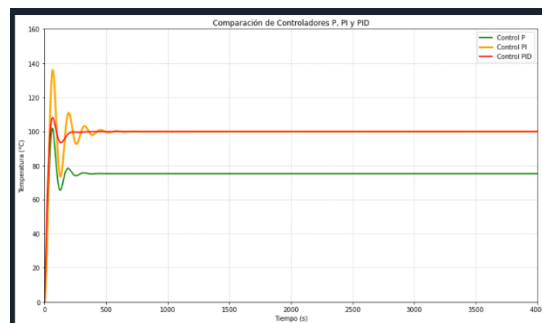
Los valores obtenidos fueron:

P = 3

PI = 0.04629

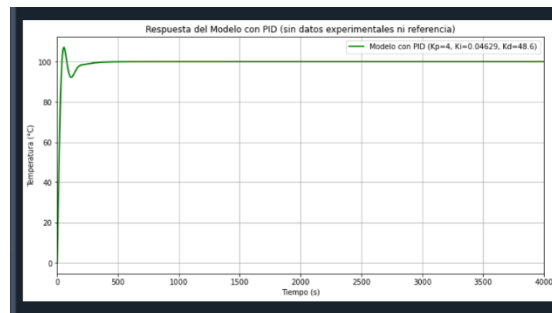
PID = 48.6

Una vez obtenidos los valores de los controladores P, PI y PID mediante el segundo método de Ziegler – Nichols, utilizando los valores obtenidos de P, PI y PID se realiza una simulación correspondiente en el software de Python.



Gráfica 2. Controladores P, PI y PID.

En la gráfica 2 se presenta la comparación entre los controladores P, PI, y PID. La gráfica verde ilustra el comportamiento del controlador P (Proporcional), mientras las gráficas naranja y roja que se observan muy aproximadas entre sí, la gráfica amarilla presenta el desempeño del controlador PI (Proporcional – Integral) y de la gráfica roja representa el controlador PID (Proporcional – Integral – Derivativo). De esta manera, se establece la configuración final del controlador PID aplicado al horno de tratamiento térmico para semiconductores, evidenciando su capacidad para lograr una respuesta estable, precisa y eficiente.

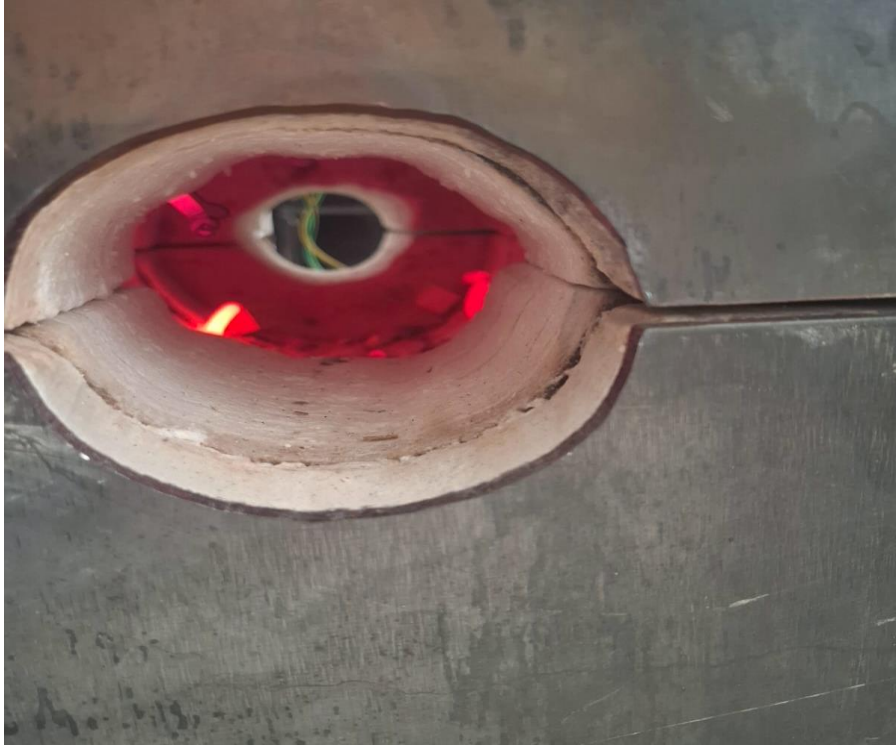


Gráfica 3. Controlador PID.

Finalmente, en la gráfica 3 se observa la respuesta del sistema propuesto (curva verde). La gráfica verde presenta el controlador PID, se observa un mayor amortiguamiento y una respuesta más estable, demostrando la eficiencia del control PID aplicado.

En conjunto, la comparación que muestra el sistema ajustado mediante el controlador PID ofrece un desempeño más robusto y eficiente, reduciendo oscilaciones y manteniendo la salida en condiciones estables frente a la señal de referencia.

B) Caracterización de horno grande



1.- Principio del Funcionamiento

Al hacer uso de la resistencia, esta debió estar energizada por electricidad. La electricidad pasó por un conductor, el cual el conductor permitió el flujo de corriente eléctrica, donde parte de la energía cinética de los electrones se transformó en calor debido al choque que sufren los electrones con las moléculas del conductor.

La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica dependió directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo durante el cual circuló por el conductor y de la resistencia que el mismo opuso al paso de la corriente (Francis, 1981). Matemáticamente, esto se expresó mediante la siguiente fórmula:

$$Q = I^2 * R * t \quad (1)$$

Donde:

Q = Es la energía calorífica producida por la corriente expresada en Joules.

I = Intensidad de la corriente que circula por el conductor en Amperes.

R = Resistencia eléctrica del conductor expresada en ohm.

T = Tiempo en segundos.

A continuación, se realizó el cálculo del área del horno. Se recordó que, en la fase previa del diseño del horno, se explicó que este contaba con un orificio de 8.3 cm de diámetro, en cuyo interior se instaló una resistencia eléctrica de calentamiento. Al poner en funcionamiento dicha resistencia, esta pudo calentar al tubo de cuarzo que se colocó en el orificio situado.

Para llevar a cabo esto de manera eficiente, se consideró que la conducción es el mecanismo de transferencia de calor en el que la energía térmica se transfirió de un punto a otro mediante la interacción de los átomos y moléculas de la materia a través del conductor.

Se tomó en cuenta el área del horno utilizando la siguiente fórmula:

Dado que el horno tenía forma rectangular, se empleó la fórmula del área para un rectángulo:

$$A = B * H \quad (2)$$

$$A = (0.665m)(0.518m)(6)$$

$$A_{total} = 2.0668 m^2$$

Por lo que el área del horno es de $2.0668 m^2$.

Asimismo, se consideró el volumen del cilindro correspondiente al orificio central, anteriormente descrito, y para este cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

Fórmula del volumen del cilindro:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (3)$$

Datos:

Diámetro 8.3 cm con un radio de 4.15 cm = 0.0415 m.

Y una longitud = 66.6 cm = 0.665 m.

Despejamos:

$$V = \pi \cdot (0.0415)^2 \cdot 0.665$$

$$V = 2.802694 \times 10^{-4} m^3$$

El cilindro presentó un volumen de $2.802694 \times 10^{-4} m^3$.

Contando ya con el área que fue de $2.0668 m^2$, se procedió a calcular la resistencia térmica empleando la formula correspondiente:

$$R_T = \frac{L1}{K1A} + \frac{L2}{K2A} + \frac{L3}{K3A} \quad (4)$$

L1, L2, L3 = 1" = 0.0254 m.

1" = Es el espesor de cada pared.

K = Conductividades térmicas.

K1 = 1.05 W/mK

K2 = 0.07 W/mK

K3 = 0.3 W/mK

A = $2.0668 m^2$

Sustituimos valores de la anterior ecuación:

$$R_T = \frac{L1}{K1A} + \frac{L2}{K2A} + \frac{L3}{K3A}$$
$$R_T = \frac{0.0254 m}{1.05 W/mK (2.0668 m^2)} + \frac{0.0254 m}{0.07 W/mK (2.0668 m^2)} + \frac{0.0254 m}{0.3 W/mK (2.0668 m^2)}$$

$$R_T = 0.011704 Kw + 0.175564 Kw + 0.040965 Kw$$

$$R_T = 0.228233 K/w$$

Por lo que la resistencia térmica será de 0.228233 K/w.

Ahora con la siguiente fórmula que se muestra, se obtendrá la potencia que se necesitará para disipar las resistencias eléctricas para obtener la temperatura deseada.

$$Q = \frac{\Delta T}{RT} \quad (4)$$

Donde:

ΔT = Diferencia de temperatura entre dos puntos.

RT = Resistencia total.

Por lo que, tendremos una temperatura interior de 300 °C y la temperatura exterior del clima.

$$T_{int} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C} (573.15 \text{ K})$$

$$T_{ext} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C} (298 \text{ K})$$

$$R_T = 0.228233 \text{ K/w}$$

$$q = \frac{573.15 - 298 \text{ K}}{0.228233 \text{ K/w}}$$

$$q = 1205.566 \text{ W}$$

Se recordó que el voltaje es la diferencia de potencial entre los conductores. Para poder definir la corriente se usa de la fórmula de la ley de ohm, la cual establece la relación entre voltaje, corriente y resistencia en un circuito eléctrico.

La Ley de Ohm indicó que la corriente es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia del circuito. (Servicios Condomex, 2009). Matemáticamente, se expresó como:

$$V = I * R \quad (9)$$

El circuito será alimentado con 120 V, entonces: $I = 1205.566 \text{ W} / 120 \text{ V} = 10.046$ Amperes.

Con el valor de la corriente obtendremos el valor de la resistencia con:

$$R = V / I = 120 / 10.046 = 11.945 \text{ } \Omega$$

Para este horno utilizaremos un tipo de material especial para hornos de altas temperaturas llamado Nicromo, el cual es una aleación de níquel- cromo.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, haremos uso de una resistencia eléctrica de calentamiento, el cual es una resistencia de 11.945 ohmios.

Debemos tener claro que el voltaje es la diferencia de potencial entre los conductores. Para poder definir la corriente se usa de la fórmula de la ley de ohm, que establece la relación entre el voltaje, la corriente y la resistencia en un circuito eléctrico.

Posteriormente, se hizo uso de la Ley de Watt, la cual estableció que la potencia consumida por una carga es directamente proporcional al voltaje suministrado y a la corriente que circula por el circuito (Domínguez, 2009). Matemáticamente se expresa como:

$$P: V.I \quad (6)$$

Donde:

P: Potencia (Watts)

V: Voltaje (V)

I: Corriente (A)

La potencia se calculó de la siguiente manera:

$$P: (127V)(11.945A) = 1517.015 \text{ Watts}$$

Por lo tanto, el circuito consumió 1517.015 *Watts*.

Para este horno utilizó el material especializado para altas temperaturas en este caso una aleación Níquel – Cromo (Ni-Cr), la cual ofreció una alta resistencia al calor y una mayor vida útil, debido a que mantuvo su integridad estructural aun en condiciones térmicas elevadas.

Como se mencionó anteriormente, se empleó una resistencia de aleación Níquel-Cromo de calibre 16.

Diámetro del alambre (AWG 16): $D = 6.9 \text{ mm}$.

Radio: $r = 3.45 \text{ mm} - 0.00345 \text{ m}$.

Resistividad de (20°C): $\rho = 1.25 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$.

Factor de temperatura de trabajo: $C_t: 110 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$

Con esta información, se procedió al cálculo del área de la sección transversal del alambre:

$$A = \pi r^2 \quad (7)$$

$$A = \pi (0.00345 \text{ m})^2$$

$$A = 3.73928 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Resistencia eléctrica a 20 °C.

Este dato resulto importante, ya que permitió conocer la resistencia por metro que existe en el nicromo.

$$R_{20} = \frac{\rho * L}{A} \quad (8)$$

Donde:

ρ = Resistividad.

L = Longitud.

A = Área de sección transversal.

Sustituimos valores:

$$R_{20} = \frac{1.25 \times 10^{-6} \Omega \cdot m * 1 m}{3.73928 \times 10^{-5} m^2}$$

Obtenemos el resultado:

$$R_{20} = 0.33428 \Omega$$

De esta manera, se determinó que por cada metro existieron 0.33428 Ω .

La resistencia eléctrica de trabajo se calculó mediante el coeficiente de resistividad, ya que este coeficiente de resistividad permitió conocer el cambio de resistencia debido a los cambios de temperatura. El valor del coeficiente para el nicromo a 1100 °C fue de 1.045, quedando el cálculo de la siguiente manera:

$$R_t = C_t * R_{20} \quad (9)$$

$$R_t = 1.045 * 0.33428 \Omega$$

$$R_t = 0.3493 \Omega$$

Con este resultado se determinó que la resistencia eléctrica a la temperatura de trabajo cambió a 0.3493 Ω por metro.

Finalmente, con el valor obtenido de 11.945 Ω para la resistencia total del horno y el valor de 0.3493 Ω por metro correspondiente a la resistencia de trabajo, fue posible calcular la cantidad de material necesaria para poder hacer uso de la resistencia:

$$L = \frac{R}{R_T} \quad (10)$$

De esta forma obtenemos:

$$L = \frac{11.945 \Omega}{0.3493 \Omega/m}$$

$$L = 34.19 m$$

2.- Caracterización experimental de calentamiento

El procedimiento experimental consistió en elevar progresivamente la temperatura del horno desde 100 °C hasta 300 °C, registrando los valores de temperatura máxima y mínima, así como los tiempos de subida y bajada. Las mediciones se realizaron con un cronómetro digital, promediando seis lecturas por cada punto de temperatura con el fin de garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los datos. Finalmente, se presentan los datos experimentales obtenidos para cada temperatura. Cada tabla incluyó los valores de subida y bajada de la temperatura, junto con el tiempo requerido para alcanzar dichos valores. La información completa se anexó desde la tabla 1 hasta la tabla 5.

Temperatura deseada a alcanzar:
100°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4	Vmax5	Vmax6
Subida	Tmax: 119.00	Tmax: 118.00	Tmax: 118.00	Tmax: 118.00	Tmax: 118.00	Tmax: 118.00
Tiempo	Tiempo: 3:40min	Tiempo: 3:20min	Tiempo: 3:25	Tiempo: 3:36	Tiempo: 3:47	Tiempo: 3:50min
Bajada	Tmin: 97.00	Tmin: 97.00	Tmin: 97.00	Tmin: 97.00	Tmin: 97.00	Tmin: 97.00
Tiempo	Tiempo: 6:53min	Tiempo: 6:53	Tiempo: 7:00	Tiempo: 7:00min	Tiempo: 6:58min	Tiempo: 7:15min

Tabla 1. Temperatura de 100 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
150°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4		
Subida	Tmax: 167.00	Tmax: 167.00	Tmax: 169.00	Tmax: 167.00	Tmax: 167.00	Tmax: 167.00
Tiempo	Tiempo: 2:50	Tiempo: 3:10	Tiempo: 3:20	Tiempo: 2:55	Tiempo: 3:18	Tiempo: 3:18

Bajada	Tmin: 150.00	Tmin: 150.00	Tmin: 150.00	Tmin: 150.00	Tmin: 150.00	Tmin: 150.00
Tiempo	Tiempo: 3:42min	Tiempo: 3:33min	Tiempo: 3:30min	Tiempo: 3:32min	Tiempo: 3:26min	Tiempo: 3:35min

Tabla 2. Temperatura de 150 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
200°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4		
Subida	Tmax: 211.00	Tmax: 211.00	Tmax: 211.00	Tmax: 211.00	Tmax: 211.00	Tmax: 210.00
Tiempo	Tiempo: 2:30	Tiempo: 2:15min	Tiempo: 2:15min	Tiempo: 2:13min	Tiempo: 2:20min	Tiempo: 2:15min
Bajada	Tmin: 197.00	Tmin: 197.00	Tmin: 197.00	Tmin: 197.00	Tmin: 197.00	Tmin: 197.00
Tiempo	Tiempo: 1:47min	Tiempo: 1:50min	Tiempo: 1:57min	Tiempo: 2:00min	Tiempo: 1:58min	Tiempo: 1:40min

Tabla 3. Temperatura de 200 °C.

Temperatura deseada a alcanzar:
250°C

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4		
Subida	Tmax: 260.00	Tmax: 259.00	Tmax: 259.00	Tmax: 260.00	Tmax: 260.00	Tmax: 260.00
Tiempo						

	Tiempo: 1:56min	Tiempo: 1:51min	Tiempo: 1:50min	Tiempo: 1:59min	Tiempo: 1:55min	Tiempo: 1:50min
Bajada	Tmin: 247.00	Tmin: 247.00	Tmin: 247.00	Tmin: 247.00	Tmin: 247.00	Tmin: 247.00
Tiempo	Tiempo: 1:40min	Tiempo: 1:27min	Tiempo: 1:23min	Tiempo: 1:28min	Tiempo: 1:30min	Tiempo: 1:32min

Tabla 4. Temperatura de 250 °C.

Temperatura deseada a alcanzar: 300°C
--

	Vmax1	Vmax2	Vmax3	Vmax4	Vmax5	Vmax6
Subida	Tmax: 308.00	Tmax: 308.00	Tmax: 308.00	Tmax: 307.00	Tmax: 307.00	Tmax: 307.00
Tiempo	Tiempo: 1:40min	Tiempo: 1:40min	Tiempo: 1:44min	Tiempo: 1:35min	Tiempo: 1:31min	Tiempo: 1:30min
Bajada	Tmin: 296.00	Tmin: 297.00	Tmin: 297.00	Tmin: 297.00	Tmin: 297.00	Tmin: 297.00
Tiempo	Tiempo: 1:05min	Tiempo: 1:00min	Tiempo: 1:05min	Tiempo: 56segundos	Tiempo: 55segundos	Tiempo: 1:00min

Tabla 5. Temperatura de 300 °C.

El comportamiento general mostro un incremento progresivo de la velocidad de respuesta del sistema conforme la temperatura aumentaba, evidenciando una reducción en el tiempo de asentamiento y un mayor factor de amortiguamiento.

3.- Calculo de parámetros dinámicos

Obtenidos los datos experimentales, se calcularon los parámetros característicos de un sistema de segundo orden: porcentaje de sobreelongación (M_p), factor de amortiguamiento relativo (ξ), frecuencia natural amortiguada (ω_d), frecuencia natural no amortiguada (ω_n), sigma (σ), y los tiempos de asentamiento al 2% y al 5%. Los cálculos se llevaron a cabo en la aplicación excel, aplicando las fórmulas correspondientes. A continuación, se muestran las figuras de los resultados obtenidos.

Caracterización Horno Grande				
Temperatura alcanzar	Temperatura maxima	Porcentaje	Formula de sobreelongacion Maxima	Resultado de Mp
100	119	100%	$M_p = \frac{c(\tau_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \cdot 100\%$	0.19
153	167	100%		0.0915
200	211	100%		0.055
250	260	100%		0.04
300	308	100%		0.0267

Figura 1. Valores de sobre elongación máxima.

En la figura 1 se observa la relación entre la temperatura deseada y el porcentaje de la sobreelongacion máxima. Los valores obtenidos permiten identificar el nivel de sobrepaso del sistema en cada punto de temperatura.

Formula de amortiguamiento ζ	Resultado de ζ
$\zeta = \frac{[ln(Mp)]^2}{\pi^2 + [ln(Mp)]^2}$	0.467345
	0.605687
	0.678341
	0.715645
	0.755637

Figura 2. Valores de factor de amortiguamiento.

La figura 2 presentó los valores calculados del factor de amortiguamiento relativo, obtenidos a partir de MP. Se apreció un incremento del amortiguamiento conforme aumenta la temperatura, lo que indica un comportamiento más estable.

Formula de Omega D Wd	Resultado Wd
$W_d = \frac{\pi}{T_p}$	0.01428
	0.01848
	0.020944
	0.027083
	0.031416

Figura 3. Valores de omega D "WD".

Formula de frecuencia natura Wn	Resultado wn
$W_n = \frac{W_d}{\sqrt{1 - \xi^2}}$	0.016152
	0.023225
	0.028505
	0.038775
	0.047964

Figura 4. Valores de frecuencia natural Wn.

Las figuras 3 y 4 mostraron las frecuencias naturales amortiguadas y no amortiguadas del sistema, las cuales reflejaron la velocidad con la que esté sistema respondió ante variaciones térmicas.

Formula de sigma σ	Resultado de σ
$\sigma = \xi(W_n)$	0.00755
	0.01407
	0.01934
	0.02775
	0.03624

Figura 5. Valores de sigma.

La figura 5 mostró los valores de sigma, relacionados con la rapidez con la que el sistema alcanzó el estado estable.

Fórmula tiempo de asentamiento 2%	Resultado tiempo	Minutos
$T_s = \frac{4}{\sigma}$	529.88707	8.831
	284.35457	4.739
	206.86644	3.448
	144.14970	2.402
	110.36489	1.839

Figura 6. Valores de tiempo de asentamiento 2%.

Fórmula tiempo de asentamiento 5%	Resultado Ts	Minutos
$T_s = \frac{3}{\sigma}$	397.4153056	6.62
	213.2659275	3.55
	155.1498318	2.59
	108.1122786	1.80
	82.7736699	1.38

Figura 7. Valores de tiempo de asentamiento 5%.

En las figuras 6 y 7 se presentaron los tiempos de asentamiento al 2% y al 5%. Se observó que, el tiempo de asentamiento disminuyó, evidenciando un comportamiento más rápido.

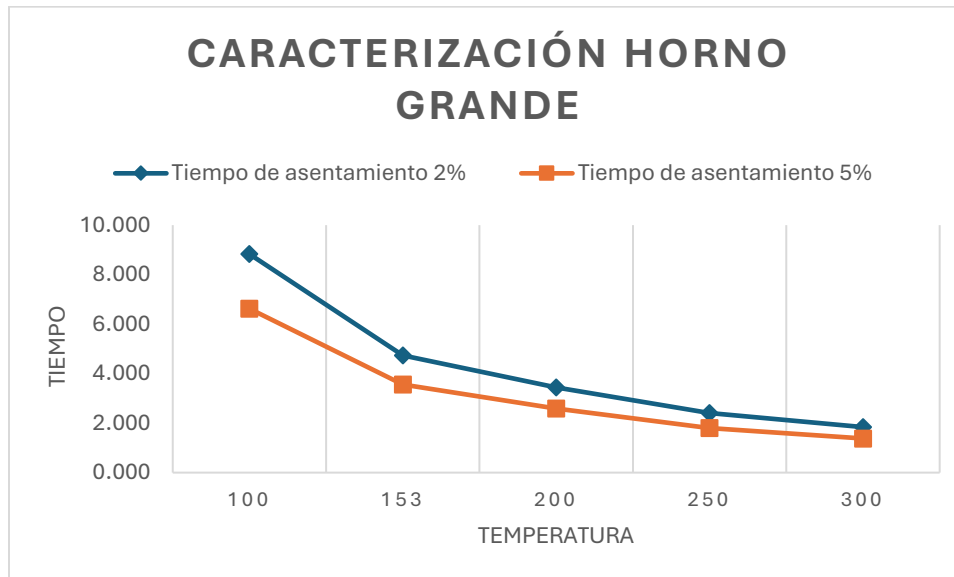
Con los resultados de tiempo de asentamiento se generó la gráfica 1, donde la línea azul representó al 2 % y la línea naranja el asentamiento al 5 %.

Esta gráfica fue obtenida mediante la aplicación de excel; en el eje X se mostró la temperatura, y en el eje Y el tiempo correspondiente.

En la línea azul está representando el tiempo de asentamiento del 2%.

La línea naranja está representando el tiempo de asentamiento del 5%.

La caracterización presentada abarco el rango de 100 °C a 300 °C de temperatura.



Grafica 1. Tiempo de asentamiento de 2% y 5%.

4.- Modelado del sistema de segundo orden para control

Se tuvo en cuenta la existencia de dos tipos de control: de lazo abierto y lazo cerrado. En este caso, se empleó un sistema de lazo cerrado.

La principal diferencia entre ambos sistemas radica en el monitoreo continuo de la variable que se desea controlar. Un sistema de lazo abierto no conoce el comportamiento de la variable de salida; es decir, no realiza ninguna corrección con la base en dicha salida. Por el contrario, un sistema de lazo cerrado monitorea constantemente la variable de salida, comparándola con una señal de referencia para evaluar su evolución y corregir cualquier desviación (Bolton, 1998). Este principio permitió al sistema de lazo cerrado ajustarse su comportamiento en tiempo real, con el objetivo de mantener la temperatura del horno, dentro de los valores deseados.

A partir de los parámetros calculados, se determinó el modelo matemático de segundo orden del sistema térmico. Para una entrada de impulso unitario $r(t)$, su transformada de Laplace correspondiente es la unidad, o $R(s) = 1$. La respuesta de impulso unitario $C(s)$ del sistema del segundo orden (Ogata, 2010), matemáticamente se expresa de la siguiente manera.

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (13)$$

Donde:

ξ = Factor de amortiguamiento relativo.

ω_n = Frecuencia natural.

S = Impulso del sistema.

Una vez obtenidos los valores calculados previamente, se sustituyeron en la ecuación, quedando expresado el modelo matemático del sistema de la siguiente manera:

$$C(s) = \frac{(0.016152)^2}{s^2 + 2(0.467345)(0.016152)s + (0.016152)^2}$$

Los valores sustituidos en la fórmula de arriba son los valores encontrados que con anterioridad se han mostrado en la figura 2 del punto B, del anexo.

Una vez sustituido los valores podemos tener el resultado final de la respuesta impulso de sistemas de segundo orden.

$$G(s) = \frac{0.000260887}{s^2 + 0.01509711s + 0.000260887}$$

Como está ecuación se identificó el comportamiento dinámico del horno. El análisis reveló que el sistema se comporta como un sistema subamortiguado, con una rápida respuesta y estabilidad térmica dentro de los márgenes de operación.

5.- Control PID

Con el modelo validado, se aplicó el segundo método de Ziegler – Nichols para la sintonización del controlador PID. Este método podemos determinar nuestra ganancia con la siguiente tabla 6, que se muestra a continuación:

Controlador	Kp	Ti	Td
P	0.5Ku	∞	0
PI	0.45Ku	1/1.2Pu	0
PID	0-6Ku	0.5Pu	0.125Pu

Tabla 6. Método Ziegler – Nichols

Donde:

P = Es el controlador Proporcional.

PI = Es el controlador proporcional-integral.

PID = Es el controlador Proporcional-Integral-Derivativo.

Ku = Ganancia critica del sistema.

Pu = Oscilación sostenida de periodo.

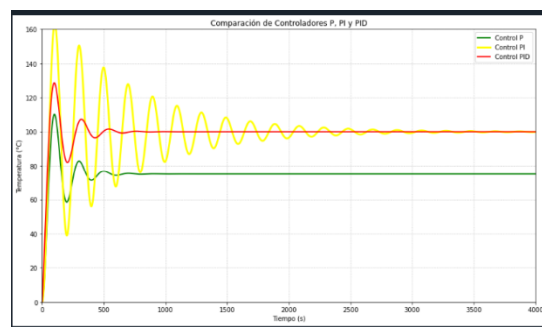
Los valores obtenidos fueron:

P = 3

PI = 0.0625

PID = 50.6

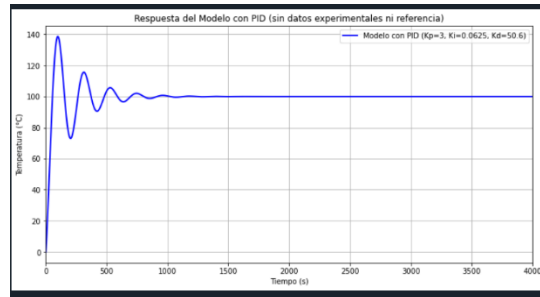
Una vez obtenidos los valores de los controladores P, PI y PID mediante el segundo método de Ziegler – Nichols, se realiza una simulación correspondiente en el software de Python.



Gráfica 2. Controladores P, PI y PID.

En la gráfica 2 se presenta la comparación entre los controladores P, PI, y PID. La gráfica verde ilustra el comportamiento del controlador P (Proporcional), mientras las gráficas amarilla y roja que se observan muy aproximadas entre sí, la gráfica amarilla presenta el desempeño del controlador PI (Proporcional – Integral) y de la gráfica roja representa el controlador PID (Proporcional – Integral – Derivativo). De esta manera, se establece la configuración final del controlador PID aplicado al horno de tratamiento térmico para

semiconductores, evidenciando su capacidad para lograr una respuesta estable, precisa y eficiente.



Gráfica 3. Controlador PID.

Finalmente, en la gráfica 3 se observa la respuesta del sistema propuesto (curva azul). La gráfica azul presenta el controlador PID, se observa un mayor amortiguamiento y una respuesta más estable, demostrando la eficiencia del control PID aplicado. En conjunto, la comparación que muestra el sistema ajustado mediante el controlador PID ofrece un desempeño más robusto y eficiente, reduciendo oscilaciones y manteniendo la salida en condiciones estables frente a la señal de referencia.

C) Costos

En este apartado pondremos los costos de nuestros materiales que hemos utilizado para nuestro horno.

No. Piezas	Material	Imagen	Costo
3	Termopares		400\$
3	Módulos MAX 6675 de convertidor Analógico a digital		400\$
1	Caja de madera		90\$
1	Caja metálica		300\$
1	Manta térmica		550\$
3	Tornillos		60\$
3	Tuercas		35\$

1	Alambre de temperatura		450\$
20	Jumpers		30\$
3	Resistencias de 1k		3\$
1	Arduino uno R3		400\$
		Total	2,718\$