



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA TERMOFORMADORA PARA LA
ELABORACIÓN DE PIEZAS PLÁSTICAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Ingeniera en Mecatrónica / Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: LAURA VERENICE MIRANDA CARRASCO
ALVARO MARCELO ZACASARI AZANZA

TUTOR: ING. LUIS MARCELO LÓPEZ LÓPEZ, PhD.
CO-TUTOR: ING. ÁNGEL EUGENIO CÁRDENAS CADME, MSc.

Cuenca - Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Laura Verenice Miranda Carrasco con documento de identificación N° 0105679633 y Alvaro Marcelo Zacasari Azanza con documento de identificación N° 0302802467; manifestamos que:


Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 13 de enero del 2023

Atentamente,



Laura Verenice Miranda Carrasco
0105679633



Alvaro Marcelo Zacasari Azanza
0302802467

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Laura Verenice Miranda Carrasco con documento de identificación N° 0105679633 y Alvaro Marcelo Zacasari Azanza con documento de identificación N° 0302802467, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Diseño de una máquina termoformadora para la elaboración de piezas plásticas”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Mecatrónica / Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 13 de enero del 2023

Atentamente,

Laura Verenice Miranda Carrasco

0105679633

Alvaro Marcelo Zacasari Azanza

0302802467

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Marcelo López López con documento de identificación N° 0102906971, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UNA MÁQUINA TERMOFORMADORA PARA LA ELABORACIÓN DE PIEZAS PLÁSTICAS, realizado por Laura Verenice Miranda Carrasco con documento de identificación N° 0105679633 y por Alvaro Marcelo Zacasari Azanza con documento de identificación N° 0302802467, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 13 de enero del 2023

Atentamente,



Ing. Luis Marcelo López López, Ph.D

0102906971

Dedicatoria

Laura

El presente proyecto de titulación está dedicado:

Dedico esta tesis a mis padres, especialmente a mi padre, porque ha sido una fuente de apoyo y motivación para mí. Él siempre ha estado ahí para motivarme y guiarme, proporcionándome herramientas para alcanzar mis sueños. A través de su compromiso, me ha demostrado que nada es imposible. Estoy muy agradecida por su constante apoyo, amor y comprensión. Esta tesis es una muestra de mi profunda gratitud. Te amo papá.

Alvaro

Con profundo aprecio y gratitud, dedico esta trabajo a mis padres. Ninguna palabra puede expresar mi amor y mi agradecimiento por todo lo que han hecho por mí. Ustedes siempre han estado ahí para apoyarme, animarme y alentarme a seguir mis sueños. Gracias por su amor incondicional e incansable que me ha dado la fuerza para llegar hasta aquí. Gracias por su comprensión, paciencia y dedicación a mi futuro. Este trabajo es una pequeña muestra de mi reconocimiento por su amor.

De igual manera, quiero agradecer a mis tíos, quienes han aportado su amor y consejos para mi crecimiento y desarrollo. A mis amigos, quienes me han brindado su apoyo y han compartido conmigo los buenos momentos. Y sobre todo a Dios y a la Virgen, quienes me han guiado en mi camino con sabiduría y amor.

Agradecimientos

Laura

Agradezco a Dios por permitirme vivir esta experiencia maravillosa llena de aprendizaje.

Agradezco inmensamente a mis padres, especialmente a mi padre por su inagotable apoyo y cariño incondicional, sus consejos y motivación ya que no hubiera logrado esta meta sin su inmenso amor.

Agradezco a mi tutor de tesis el Ing. Luis López por su paciencia, recomendaciones y guías para culminar con éxito este proyecto de titulación, y brindarnos conocimiento .

Finalmente agradezco a todas las personas que estuvieron presentes en este trayecto de mi vida especialmente a mi pareja por brindarme su apoyo y motivación así como a mis hermanos por los maravillosos momentos compartidos, también quiero agradecer a mi mascota por su reconfortante compañía en las largas noches.

Alvaro

Agradezco de todo corazón a Dios por la salud, el amor y los recursos con los que me ha bendecido.

A mis padres Gladys y Patricio, quienes me han apoyado incondicionalmente desde el principio, les doy las gracias por su amor, apoyo y comprensión.

Agradezco a mi tutor de tesis Ing.Luis Lopez por acompañarme en mi trayecto académico, haciendo de este proyecto una realidad y compartiendo su conocimiento, experiencia y consejos.

Mis más sinceras gracias a todos aquellos que han contribuido de una u otra forma para que este proyecto llegara a buen término.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XIV
Abstract	XV
1. Introducción	1
2. Problema	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Descripción del problema	4
2.3. Importancia y alcances	4
2.4. Delimitación	4
2.4.1. Espacial o geográfica	4
2.4.2. Temporal	5
2.4.3. Sectorial o institucional	5
2.5. Problemas	5
2.5.1. Problema general	5
2.5.2. Problemas específicos	5
3. Objetivos	7
3.1. Objetivo general	7
3.2. Objetivos específicos	7
4. Hipótesis	8
4.1. Hipótesis general	8
4.2. Hipótesis específicas	8
5. Marco teórico	9
5.1. Fallas mecánicas en máquinas	9
5.1.1. Pandeo	9

5.1.2.	Fricción	9
5.1.3.	Desgaste	9
5.1.4.	Flexión	9
5.2.	Polímeros	10
5.2.1.	Clasificación de los polímeros	10
5.2.2.	Propiedades térmicas	10
5.3.	Termoformado	11
5.4.	Consideraciones de diseño de una máquina termoformadora	12
5.4.1.	Diseño mecánico	12
5.4.1.1.	Sistema de presión o vacío	13
5.4.1.2.	Sistema de atemperado	13
5.4.1.3.	Sistema estructural	18
5.4.2.	Diseño electrónico	19
5.4.2.1.	Sistema de calentamiento	19
5.4.2.2.	Sistema de termoformado	24
5.4.2.3.	Sistema motriz	27
5.4.3.	Diseño de Control	29
5.4.3.1.	Control manual	29
5.4.3.2.	Controladores automáticos	30
6.	Marco metodológico	31
6.1.	Metodología de la Investigación	31
6.1.1.	Enfoque	31
6.1.2.	Tipo	31
6.1.3.	Alcance	31
6.2.	Metodología del proceso	31
6.3.	Establecimiento de los parámetros iniciales para el diseño mecánico y electrónico de la máquina termoformadora	32
6.3.1.	Parámetros mecánicos:	32
6.3.1.1.	Dimensionamiento de la máquina termoformadora	32
6.3.1.2.	Materiales de la máquina termoformadora	33
6.3.2.	Parámetros Electrónicos:	37
6.3.2.1.	Materiales que conforman la parte electrónica de la máquina termoformadora	37
6.3.3.	Parámetros de vacío:	42
6.3.4.	Parámetros Ergonómicos:	43
6.3.5.	Parámetros de seguridad	44
6.4.	Propuesta del diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas	45

6.4.1.	Análisis del sistema de calentamiento en el diseño	45
6.4.1.1.	Fuente de calor	45
6.4.2.	Análisis del sistema de Vacío en el diseño	56
6.4.2.1.	Potencia y tiempo de vacío	56
6.4.2.2.	Características de la cámara de vacío	57
6.4.3.	Análisis del sistema estructural en el diseño	57
6.4.4.	Análisis del sistema electrónico en el diseño	62
6.4.4.1.	Esquema de control de temperatura de lámpara IR	62
6.4.4.2.	Modelado matemático	63
6.4.4.3.	Modelado empírico por el método de Alfaro	67
6.4.4.4.	Controlador PI sintonizado mediante Dahlin	69
6.4.5.	Análisis del sistema motriz en el diseño	71
6.4.5.1.	Esquema de control de Motor Nema 23	71
6.5.	Evaluación del diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas	72
6.5.1.	Configuración del software de simulación	72
6.5.1.1.	Mallado del sistema	72
6.5.1.2.	Parámetros para la simulación	73
6.6.	Resultados	78
6.6.1.	Parámetros iniciales para el diseño mecánico y electrónico de la máquina termoformadora	78
6.6.1.1.	Parámetros mecánicos	78
6.6.1.2.	Parámetros ergonómicos	79
6.6.1.3.	Parámetros electrónicos	79
6.6.2.	Diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utiliza- da en la elaboración de piezas plásticas	79
6.6.2.1.	Animación	79
6.6.2.2.	Planos del equipo para termoformado	80
6.6.3.	Evaluación del diseño mecánico y electrónico de una máquina termo- formadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas	81
7.	Cronograma y actividades	83
8.	Presupuesto	84
8.1.	Recursos materiales	84
9.	Conclusiones	85
10.	Recomendaciones	86
	Referencias	91

ANEXOS 92

Lista de Tablas

5.1. Tabla de polímeros y su temperatura de termoformado.	13
5.2. Límites de temperaturas de diferentes termoplásticos	17
6.1. Materiales principales de la máquina termoformadora	34
6.2. Materiales electrónicos para la máquina de termoformado	37
6.3. Materiales principales para el sistema de vacío	42
6.4. Altura y tiempo de calentamiento para lámina PVC de 0.5 mm de espesor .	52
6.5. Datos del sistema de calentamiento y lámina PVC	54
6.6. Datos del sistema de calentamiento y lámina PVC (1)	55
6.7. Datos del sistema de calentamiento y lámina PVC (2)	55
6.8. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables	61
6.9. Constantes del sistema	66
6.10. Parámetros mecánicos del equipo de termoformado	78
6.11. Parámetros electrónicos del equipo de termoformado	79
6.12. Resultados de la temperatura de radiación en una lámina de 0.5 mm de espesor a una variación del tiempo en 1 s	81
6.13. Comparación de los parámetros simulados con los parámetros simulados . . .	82
7.1. Cronograma de actividades.	83
8.1. Recurso de talento humano	84
10.1. Matriz de consistencia lógica	93

Lista de Figuras

2.1. Universidad Politécnica Salesiana	5
5.1. Calentamiento de la lámina plástica	11
5.2. Formado de la lámina plástica	12
5.3. Factor de visión F_{1-2}	16
5.4. Boceto de la maquina termoformadora.	19
5.5. Esquema de las paredes de la base superior que sostiene la fuente de calor	22
5.6. Tipos de moldes para el termoformado	25
5.7. Fases del proceso de termoformado al vacío	25
5.8. Proceso de termoformado a presión	26
5.9. Termoformado con ayudas mecánicas	27
5.10. Actuador electro neumático	28
5.11. Servomecanismos	28
5.12. Palanca y biela	29
6.1. Método del proceso	32
6.2. Mesa para el equipo de termoformado	33
6.3. Placas de aluminio para bases	34
6.4. Lámina de aluminio perforada	35
6.5. Tubo de acero inoxidable	35
6.6. Esquema del marco móvil y la base de vacío	36
6.7. Platinas de acero inox. 304 para el marco móvil	36
6.8. Lámpara infrarroja cerámica para termoformado	38
6.9. Árbol de decisiones sensor de temperatura	38
6.10. Termocupla tipo k	39
6.11. Controlador de temperatura REX-C100	40
6.12. Motor NEMA 23	40
6.13. Driver TB6600	41
6.14. Actuador lineal	41
6.15. Fuente AC/DC de 12v y 5A	42
6.16. Aspiradora Stanley SL18910P-3	43
6.17. Plano de trabajo para peso ligero	44

6.18. Celorón como aislante para la temperatura de calentamiento.	45
6.19. Calentador cerámico IR de 650 W	46
6.20. Dimensiones de lámina PVC	49
6.21. Tiempo de moldeo para lámina PVC	50
6.22. Diagrama de fuerzas	58
6.23. Esquema de conexión del controlador REX-C100	62
6.24. Esquema electrónico de control de temperatura	63
6.25. Señal de salida del sistema modelado	67
6.26. Validación del modelo empírico	68
6.27. Control PI en Simulink	69
6.28. Señal de salida del control PI	70
6.29. Señal de salida con control del sistema	70
6.30. Actuador lineal conectado al motor Nema 23	71
6.31. Esquema de control de motor Nema 23	72
6.32. Mallado del equipo de termoformado para la simulación	73
6.33. Propiedades del aire	73
6.34. Propiedades físicas de la lámpara	74
6.35. Propiedades físicas del PVC	74
6.36. Temperatura de la fuente de calor	75
6.37. Calor generado entre la fuente de calor y el aire	75
6.38. Coeficiente de convección en la cantidad de aire circulante	77
6.39. Potencia de la lámpara de calor	77
6.40. Animación de la máquina termoformadora	80

Resumen

La investigación presenta un enfoque metodológico cuantitativo por los datos obtenidos de temperatura del calefactor, temperatura de plastificación del polímero y las resistencias mecánicas de flexión; además de ser de tipo básica al aplicar conceptos de transferencia de calor en la fabricación de láminas termoformadas para finalmente tener un alcance descriptivo y explicativo, donde se aplica los conceptos teóricos a un diseño real y se explica el efecto del principio teórico sobre los resultados obtenidos por simulación. El objetivo del presente trabajo de titulación, es el diseño de una máquina termo formadora para la elaboración de piezas poliméricas, proponiendo su diseño mecánico, electrónico y de control de temperatura, estableciendo los parámetros para el diseño y su posterior evaluación. El diseño mecánico está conformado por una base superior e inferior rectangulares sostenidas por cuatro columnas, un marco porta lámina, una fuente de calor, plancha taladrada (cámara de vacío), sensores, actuadores y controles.

Palabras clave: Termoformado, polímero, diseño, transferencia de calor, control.

Abstract

This investigation of “Design of a thermoforming machine for the production of plastic parts manufacturing” presents a methodological focus due to the data obtained of the heater temperature, polymer plasticization temperature and the mechanical resistance flexion; In addition, to be a basic type when apply concepts of heat transfer in the fabrication process of sheet thermoformed to finally have a descriptive and explicative extent, where it applies theoretical concepts to a real design and it explains the effect of the theoretical principle about the results obtained by simulation. The objective of the present investigation, is the design of a thermoforming machine for the elaboration of polymeric parts, proposing the mechanical design, electronic and control of temperature, establishing the parameters for the design and their later evaluation. The mechanical design is composed of a top and bottom base supported by four columns, a sheet holder frame, a heat source, a driller plate (vacuum chamber), sensors, actuators and controls.

Keywords: Thermoforming, polymer, design, heat transfer, control.

1. Introducción

La industria del plástico a crecido de manera exponencial en los últimos años, así como la tecnología para su producción ya que gracias a la versatilidad de este material permite sustituir a otros materiales y manufacturar elementos con menos recursos y costos. Según (Statista, 2021) y de acuerdo a (González Fernández, 2022), a nivel mundial en 1950 la producción de plástico era de 1.5 toneladas y en el 2019 se incremento a 368 toneladas, lo que indica un crecimiento tanto económico e industrial llegando a ser un impulso para sectores manufactureros de polímeros como la impresión 3D entre otras. Los polímeros son fáciles de transformar debido a sus propiedades físicas que permiten ser moldeados, prensados, inyectados, extruidos entre otros procesos de transformación, por esta razón se pueden fabricar productos aplicados en distintas áreas, desde fundas y empaques para embalaje hasta productos para el hogar como sillas, mesas y más. En Latinoamérica el crecimiento del sector productivo de plásticos no es la excepción, en Colombia según Vargas-Isaza, Posada-Correa, Jaramillo-Zapata, y García (2015) manifiestan que “la capacidad instalada total para la producción de resinas plásticas pasó de 1.04 millones de toneladas en 2008 a 1.15 millones en 2010”.

Pérez (2014) indica que en México se registró “en el último año con datos disponibles del 2012, que la producción alcanzó de nuevo un máximo histórico de 288 millones de toneladas”, esto representa un incremento de capital que ingresa a la industria del plástico y que por tal razón su tecnificación es la base fundamental para una próspera producción. En el Ecuador la industria del plástico es una parte importante en varias cadenas de producción, según Aseplast (2017) en el país existen 120 empresas dedicadas a la industrialización e intermediación de productos plásticos que se relacionan con procesos de extrusión, soplado, termoformado, inyección y rotomoldeo que están distribuidas de la siguiente manera: 63,69% en Guayaquil, 24,51% en Quito y 9,80% entre Cuenca Ambato y Machala, además se registró un crecimiento exponencial de importaciones de resinas según Aseplast (2017) en el 2012 con un total de importaciones de 288.662 toneladas y en el 2016 se presentó un incremento a 345.752 toneladas. Este sector debido a su alta demanda se encuentra en constante innovación, por tal razón es indispensable analizar su evolución en el proceso de transformación conocido como termoformado.

La Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca cuenta con laboratorios especializados

en el área de polímeros, con máquinas que permiten recrear procesos de transformación como extrucción e inyección con fines educativos; sin embargo, carece de una máquina de termoformado que en la actualidad son equipos importantes debido a la producción global y siendo uno de los procesos más utilizados en la industria plástica después de la inyección, es por esta razón, que se diseñó un equipo de termoformado para la elaboración de piezas plásticas, permitiendo así a los estudiantes conocer el procedimiento que consiste en el calentamiento de una lámina plástica mediante gas o por resistencias eléctricas y el conformado que se lo realiza mediante un sistema de vacío, a presión y mecánico. Para el diseño de un equipo como estos, se requiere de conocimientos en ciencia de los materiales, diseño mecánico, termodinámica, transferencia de calor y sistema de control.

2. Problema

2.1. Antecedentes

El termoformado es una técnica muy antigua, los egipcios observaron que se podían calentar caparazones de tortugas para moldear recipientes y figuras. Cuando se empezó a disponer de polímeros sintéticos, el termoformado fue una de sus primeras aplicaciones (Acevedo Obando, Riega, Gabriel, y cols., 2015), esta técnica con el paso del tiempo ha tenido una gran acogida a nivel industrial debido a que se obtiene varios productos útiles como recipientes, artículos, entre otros. Los polímeros son la base de este proceso debido a que son maleables al calor y capturan una forma al reducir su temperatura.

Según Calderón Garrido (2014) indica que “la industria del plástico en el Ecuador muestra un crecimiento económico sostenido durante el periodo 2001 al 2007”, por lo que, al encontrar un incremento económico en este sector, se necesitará mano de obra especializada en los diferentes procesos de transformación de polímeros, de manera que se genere un apoyo al crecimiento de las empresas relacionadas con el sector industrial y uno de los procesos que está en crecimiento debido al bajo costo de producción y al incremento de productos que necesitan empaques y donde los mismos sean visibles, es el proceso de termo formado, sin embargo, es importante recalcar que el termo conformado o termo formado es un proceso poco atendido debido a su recién crecimiento en el sector industrial.

La Universidad Politécnica Salesiana cuenta con laboratorios especializados en el área de materiales poliméricos, entre ellos el laboratorio de ensayo de polímeros y el de transformación de polímeros, que disponen de varias máquinas para determinar sus propiedades físicas y reológicas, como también simular procesos de producción continua con fines educativos. Entre las principales máquinas está una inyectora, extrusora de perfiles, extrusora de tubos, extrusora para soplado de fundas y para peletizado así como también máquinas de ensayos como el Melt Index, reómetro capilar, plastógrafo y un equipo para medir la permeabilidad en láminas finas.

2.2. Descripción del problema

La falta de capacitación a los estudiantes en conocimientos teóricos y prácticos que se pueden adquirir en laboratorios especializados en polímeros sobre uno de los procesos de transformación más utilizados en la manufactura de productos plásticos por falta de material didáctico, presenta un problema en el desarrollo profesional y al sector industrial al no contar con personal capacitado en el tema, por tal manera, la capacitación en el manejo de este tipo de equipo y el desarrollo del mismo, es la respuesta a la necesidad que tienen algunas organizaciones o instituciones de contar con un personal calificado y productivo, mediante conocimientos teóricos y prácticos que potenciará la productividad de la empresa y desempeño del personal (Molina, 2019).

2.3. Importancia y alcances

En los laboratorios de la universidad politécnica salesiana se conoce de la ausencia de una máquina termoformadora. Con base en lo antes mencionado, este proyecto busca solventar la ausencia de esta máquina e implementarla como material didáctico para los estudiantes. Además, el presente trabajo tiene como finalidad producir piezas de plástico en pequeñas cantidades como muestras de laboratorio en algunas de las prácticas de los estudiantes.

2.4. Delimitación

El trabajo de titulación desarrollado se delimitó en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o geográfica

El presente trabajo de titulación se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana (Figura 2.1), en la ciudad de Cuenca provincia del Azuay; sin embargo, la información fué recabada de otros trabajos de titulación, industrias y empresas vinculadas al tema.

Figura 2.1

Universidad Politécnica Salesiana.



Nota: En la Figura se observa la ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana en su sede matriz ubicada en la ciudad de Cuenca – Ecuador (Google Maps, 2023).

2.4.2. Temporal

Para el desarrollo del trabajo de titulación se consideró 400 horas de trabajo planificadas en el cronograma de actividades propuesto, las mismas que se realizaron en la asignatura TT1 y se finalizó en la asignatura TT2.

2.4.3. Sectorial o institucional

El trabajo de titulación se desarrolló en la Universidad Politécnica Salesiana, y está dentro del sector educativo en el área de productos didácticos mecatrónicos para la enseñanza.

2.5. Problemas

2.5.1. Problema general

- ¿Es factible diseñar una máquina de termoformado para la elaboración de piezas de plástico.?

2.5.2. Problemas específicos

- ¿Se podrá establecer los parámetros iniciales para el diseño mecánico y electrónico de una máquina de termoformado para la elaboración de piezas de plástico?
- ¿Es factible proponer el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas?

- ¿Se logrará evaluar el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas?

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Diseñar una máquina de termoformado para la elaboración de piezas de plástico.

3.2. Objetivos específicos

- Establecer los parámetros iniciales para el diseño mecánico y electrónico de una máquina de termoformado para la elaboración de piezas de plástico.
- Proponer el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas.
- Evaluar el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas.

4. Hipótesis

4.1. Hipótesis general

- Se Diseñara una máquina de termoformado para la elaboración de piezas de plástico.

4.2. Hipótesis específicas

- Los parámetros iniciales establecerán el diseño mecánico y electrónico de una máquina de termoformado para la elaboración de piezas de plástico.
- Se Propondrá el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas.
- Se evaluará el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas.

5. Marco teórico

5.1. Fallas mecánicas en máquinas

El funcionamiento mecánico de una máquina permite identificar posibles fallos que deberán ser considerados en el diseño:

5.1.1. Pandeo

Una estructura mecánica con pandeo presenta una curva cuando está con pandeo y que en muchos casos es notoria y podría llegar a ser una falla peligrosa, ya que indica que se ha sobrepasado la compresión permitida. Una columna intermedia o una grande fallarán por pandeo cuando la carga axial aplicada exceda algún valor crítico. El esfuerzo de compresión puede estar muy por debajo de la resistencia a la fluencia del material, en el momento del pandeo (Norton, 2011).

5.1.2. Fricción

Cuando la superficie de un cuerpo se desliza sobre otro, los dos cuerpos ejercen una fuerza de rozamiento entre ellos. La fuerza de rozamiento de cada cuerpo es de dirección opuesta a su movimiento relativo con relación al otro cuerpo. Las fuerzas de rozamiento se oponen automáticamente a este movimiento relativo y nunca contribuyen a él (Moreno Martínez, Font Moll, y Ramírez Maciel, 2016).

5.1.3. Desgaste

Al entrar en contacto partes o elementos mecánicos, tendrán fricción y por ende existirá un desgaste de material, donde La falla por desgaste usualmente implica la pérdida de algo de material de la superficie de las piezas sólidas del sistema (Moreno Martínez y cols., 2016).

5.1.4. Flexión

Una de las principales causas de la flexión en una viga es la siguiente: al estar en flexión pura, el momento flector será constante a lo largo de la pieza y, por lo tanto, la deformación producida por este será la misma en todas las rebanadas de la viga, en consecuencia, la

directriz de la viga se deformará (Cervera, 2001).

La fórmula de flexión de acuerdo a Mott (2009) esta dada por:

$$\sigma_m = \frac{M \times C}{I} \quad (5.1)$$

Donde:

M momento flexionante en la sección de interés.

C distancia del eje centroidal de la viga a las fibras más externas.

I momento de inercia de la sección transversal con respecto a su eje centroidal.

5.2. Polímeros

5.2.1. Clasificación de los polímeros

Existe una gran variedad de polímeros, al igual que sus usos y aplicaciones que sirven para su clasificación. Tienen un sin número de aplicaciones en la industria como: envases, pinturas, adhesivos, entre otros. Por definición, un polímero se puede entender como la unión de varias moléculas denominados monómeros y las reacciones a través de las cuales estos se obtienen se conocen como reacciones de polimerización, que pueden ser de diferentes formas para así obtener una gran variedad de polímeros de acuerdo a su estructura molecular (Gomis, 2012). Para el proceso de termoformado el polímero que emplea es el termoplástico, ya que estos “se ablandan y funden al calor, por lo que puede moldearse plásticamente para volver al estado sólido cuando se enfrían, pudiéndose repetirse estos fenómenos indefinidamente” (Spínola Romero, 2001).

5.2.2. Propiedades térmicas

El calor específico y la conductividad térmica son las principales propiedades físicas de los polímeros que se deben considerar en el proceso de termoformado, considerando que los plásticos no son buenos conductores de calor, es por ello que las láminas de espesores gruesos requieren un tiempo de calentamiento mayor Rojas y Nelson (2019).

En el proceso de termoformado se debe considerar el método de calentamiento y el tamaño del equipo para el calentamiento de la lámina de plástico. La cantidad de calor transferida a una lámina de plástico de acuerdo a Cengel y Ghajar (2007) se define por la ecuación 5.2:

$$Q = mC_{prom}(T_2 - T_1) \quad (5.2)$$

Donde:

Q Cantidad de calor
m Masa
 C_p Calor específico

T_2 Temperatura final
 T_1 Temperatura inicial

5.3. Termoformado

El termoformado es un proceso que se realiza al calentar y reblandecer una lámina hecha de material termoplástico, ablandándola temporalmente para obtener así un producto que toma la forma del molde o matriz utilizado. La temperatura de calentamiento de la lámina es muy importante, ya que si no se la toma en cuenta se puede llegar a fundir la lámina cuando se la exceda, dando como resultado una mala calidad a la pieza final sin detalles definidos. Forero Lopez, Santana Acero, y cols. (2018).

■ Productos fabricados por termoformado

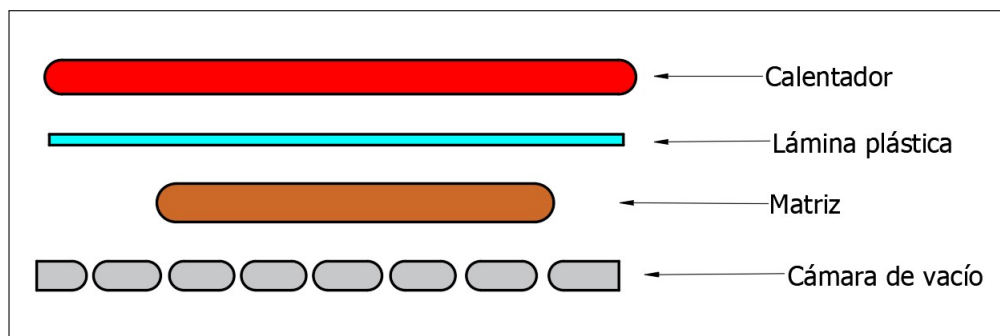
Los productos fabricados a partir del termoformado, se puede encontrar actualmente en sectores tales como: la industria del empaque, transporte, señalización y anuncios, artículos para el hogar, industria médica y en otros Plastiglas y De Cv (1999).

■ Proceso de termoformado

En el proceso de termoformado, la lámina de plástico se calienta para luego descender hacia la matriz o molde que tiene la forma definida, como se observa en la Figura 5.1.

Figura 5.1

Calentamiento de la lámina plástica.

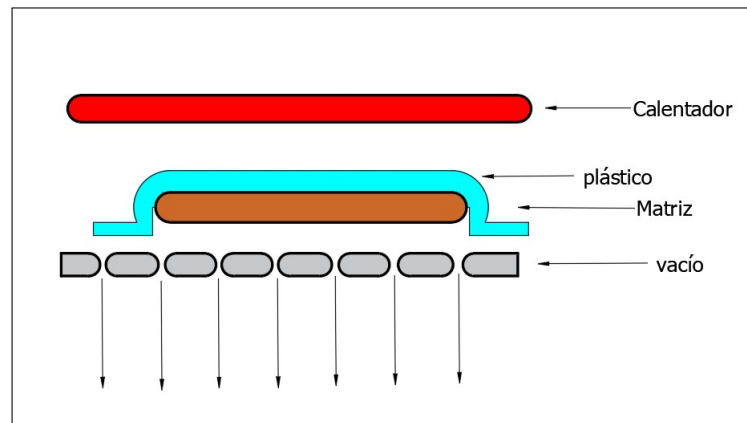


Nota: En la Figura se observa el calentamiento de la lámina plástica a través de la fuente de calor para su posterior proceso de formado (Rojas y Nelson, 2019).

Posterior al calentamiento, el aire que se encuentra entre el molde y la lámina es succionado por la parte de vacío, haciendo así que el plástico se adapte a la forma del molde, obteniendo de esta manera una copia del perfil del mismo (Figura 5.2).

Figura 5.2

Formado de la lámina plástica.



Nota: En la Figura se puede observar como la lámina de plástico se adapta al molde por la acción del vacío, para producir el perfil deseado (Rojas y Nelson, 2019).

Finalmente, se deja enfriar la lámina plástica o polimérica, para realizar la sustracción de la misma del molde y retirar el material sobrante para finalmente obtener la pieza deseada.

5.4. Consideraciones de diseño de una máquina termoformadora

5.4.1. Diseño mecánico

El diseño mecánico de una máquina termoformadora involucra el ensamble de elementos de tal manera que permita dar la forma y unidad a la estructura. Hay que recordar que en toda estructura se combinan y analizan tres aspectos como: forma, materiales y cargas. Además, el diseño del sistema estructural debe garantizar la seguridad, funcionalidad y economía de la máquina, para ello este sistema debe estar constituido de un soporte básico y un armazón que transmiten las fuerzas actuantes a sus apoyos. También, se debe tomar en cuenta el diseño de un mecanismo de movimiento que sea lo mas simple posible y nos permita transportar la lámina para cada una de las etapas del proceso de termoformado (Forero Lopez y cols., 2018). Por último, debemos tomar en consideración que la carga no sea superior a la que puede resistir el material plástico, ya que la propiedad de resistencia de los mismos varía dependiendo su composición (Forero Lopez y cols., 2018).

5.4.1.1. Sistema de presión o vacío

Depende sobre todo del espesor de la lámina, aunque también de la complejidad de la pieza. Debe controlarse, ya que si es insuficiente no se obtendrán todos los detalles y si es excesiva se pueden producir agujeros o marcas. Consiste en sujetar la lámina para colocarlo sobre el molde y que se adapte a su forma, se elimina el aire que empuja la lámina contra las paredes y contornos del molde (Morales y Candal, 2006).

5.4.1.2. Sistema de atemperado

- **Temperatura de termoformado.**

Depende sobre todo del material a transformar, aunque también de la complejidad y el espesor de la pieza.

Tabla 5.1

Tabla de polímeros y su temperatura de termoformado.

POLIMEROS	TEMPERATURA DE DEFLECCIÓN AL CALOR			TEMPERATURA DE TERMOFORMADO		
	A 264 PSI (°C)	A 66 PSI (°C)	SIN CARGA (°C)	TEMP. DE LA HOJA (°C)	TEMP DEL MOLDE (°C)	TEMP DE AYUDA (°C)
Acrílico extruido	94	98		135-175	65-75	
Acrílico cell-cast	96	110		160-180	65-75	
Acetobutirato de celulosa	65-75	75-80	120-150	140-160		
Polietileno de alta densidad		60-80	100	145-190	95	170
Polipropileno	55-65	110-115	140	145-200		
Poliestireno	70-95	70-100	100	140-170	45-65	90
Poliestireno alto impacto	85-95	90-95	120	170-180	45-65	90
SAN	100	105		220-230		
ABS	75-115	80-120	95	120-180	70-85	90
Polivinilo de cloruro (RV.C.)	70	75	110	135-175	45	80
Policarbonato	130	140	160	180-230	95-120	140

Nota: Tabla de la temperatura de termoformado de polímeros (Plastiglas de México, 2012) .

El calentamiento de una o más hojas de plástico deben ser adecuadas para el formado en un molde, esto garantiza que la hoja será formada adecuadamente. El calor debe ser distribuido de manera homogénea sobre la lámina, si esta tiene mayor espesor el tiempo de este proceso será mayor al igual que el incremento en la temperatura. Es contraproducente sobrepasar el rango de temperatura, ya que puede dañar el material generando fracturas o la degradación de este (Morales y Candal, 2006).

■ **Tiempo de calentamiento.**

Depende sobre todo del espesor y la densidad del material, aunque también del coeficiente de transmisión del mismo. Este parámetro determina el tiempo que debe permanecer la lámina en la zona de calor, contribuyendo al desplazamiento del material al fondo de los vasos o moldes (Morales y Candal, 2006).

La densidad del material de acuerdo a Burns (2004) en función de su masa y volumen se define por la ecuación 5.3:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5.3)$$

Donde:

ρ Espesor del material
 m Masa
 V Volumen del material

El tiempo que tarda en calentarse una lámina plástica, puede determinarse aplicando la ley de joule presente en la ecuación 5.4:

$$P = \frac{Q}{t} \quad (5.4)$$

Donde:

P Potencia requerida del material para termoformarse
Q Cantidad de calor requerido
t Tiempo de calentamiento

Otra forma de determinar el tiempo de calentamiento de láminas plásticas es mediante un balance de energía de la lámina PVC, usando la ecuación 5.5 (Calle Cabrera, Sánchez Marcillo, y cols., 2017).

$$\frac{m_L \times C_{prom} \times (T_{i+1} - T_i)}{\Delta t} = A_1 F_{1-2} \times \sigma \times (T^4 - T_i^4) \quad (5.5)$$

Donde:

m_L	Masa de la lámina
C_{prom}	Calor específico
T	Temperatura del calentador
T_{i+1}	Temperatura de la lámina en un instante de tiempo
T_i	Temperatura ambiente
Δt	Tiempo
$A_1 F_{1-2}$	Factor de visión
σ	Constante de Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

El factor de visión $A_1 F_{1-2}$ está determinado por el área y el factor de visión existente entre el calentador y la lámina.

El factor de visión $A_1 F_{1-2}$ de acuerdo a Kreith y Manglik (2016), se define por la ecuación 5.6:

$$\frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 \times A_1} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 \times A_2} + \frac{1}{A_1 \times \frac{F_{1-2}+1}{2}}} \quad (5.6)$$

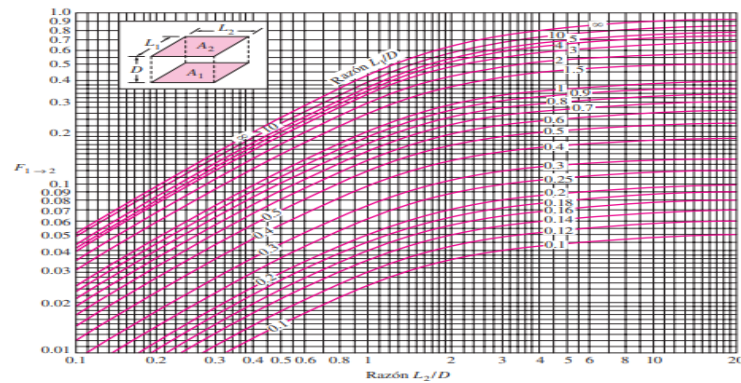
Donde:

A_1	Área del calentador
A_2	Área de la lámina
ε_1	Emitancia del calentador
ε_2	Emitancia de la lámina
F_{1-2}	Factor de visión entre la lámina plástica y el calentador

El factor de visión F_{1-2} dependerá de la distancia existente entre la fuente de calor y lámina plástica y se determina con ayuda de la Figura 5.3.

Figura 5.3

Factor de visión F_{1-2} .



Nota: En la Figura 5.3 se observa los distintos datos para el factor de visión F_{1-2} dependiendo de la distancia D del calefactor y la lámina (Cengel y Ghajar, 2007).

■ **Tiempo de enfriamiento.**

Depende de los mismos factores que el tiempo de calentamiento, y ha de ser suficiente para que el elaborado final sea resistente y no se deforme al desmoldar. El objetivo es que el material se vuelva lo suficientemente rígido, para poder ser expulsado y que la lámina conserve su forma (Morales y Candal, 2006).

■ **Altura de calentamiento.**

El tiempo de calentamiento depende de la altura a la que se encuentre la lámina plástica de la fuente de calor, por esta razón, el material plástico debe estar a una altura adecuada para que se pueda termoformar correctamente. El espacio resultante de separación entre la fuente de calor y la lámina de plástico corresponde a la altura que existe entre estos dos, en ese espacio se tiene un volumen de aire circulante que será calentado por la fuente de calor por convección. Para determinar la altura de este volumen de aire se necesita determinar su masa (Morales y Candal, 2006).

La ley del gas idea de acuerdo a Burns (2004) se define por la ecuación 5.7:

$$PV = nRT \tag{5.7}$$

Donde:

- P Presión atmosférica del lugar
- V Volumen del aire
- n Número de moles
- R Constante universal de los gases $8.314472 \frac{m^3 Pa}{mol K}$
- T Temperatura ambiente

- **Temperatura de desmoldeo.**

Esta temperatura es ideal para separar la lámina de la pieza, sin que esta resulte dañada, cabe recalcar que en este punto el enfriamiento debe ser lento y tener una distribución uniforme. En esta etapa se procede a enfriar la pieza por convección natural o “convección forzada, ya sea por aire o agua antes de desmoldar la pieza”(Rodríguez, 2012). Un enfriamiento correcto es fundamental, ya que de esto dependerá el terminado del producto final. Existe un parámetro para determinar la temperatura de desmoldeo ideal según (Throne, 1987, como se citó en (Rodríguez, 2012)) “la temperatura adecuada de desmoldeo se encuentra 10 °C por debajo de la temperatura de deflexión bajo carga”. Este parámetro se encuentra en la Tabla 1, en función de cada material y su carga se puede determinar esta temperatura.

- **Límite inferior y superior de operación.**

Si la temperatura de la lámina desciende más abajo de este parámetro, se generan esfuerzos en el material, el cual perderá brillo y da lugar procesos físicos como fisuras que comprometen el resultado final, por tal motivo es necesario verificar en la Tabla 5.2 el parámetro de Límite inferior de procesamiento junto al termoplástico seleccionado.

Al contrario, al someter una lámina a una temperatura elevada puede traer cambios físicos al material a tal punto que este puede diluirse y burbujear, esto trae consigo daño al material, estas temperaturas se ven a detalle en la siguiente tabla 5.2.

Tabla 5.2

Límites de temperaturas de diferentes termoplásticos.

<i>Material</i>	<i>Temperatura de desmolde °C</i>	<i>Límite inferior de procesamiento °C</i>	<i>Temperatura de formación °C</i>	<i>Límite superior de formación °C</i>
HDPE	82	127	146	182
ABS	85	127	146	182
PS	85	127	146	182
ACRILICO	85	149	177	193
PVC	66	93	118	149

Nota: La Tabla indica los rangos de temperatura usados en el proceso de termoformado para diferentes termoplásticos, de acuerdo con (Bejarano Arévalo y cols., 2004).

5.4.1.3. Sistema estructural

De acuerdo a Area Tecnológica (2022) al hablar de estructuras metálicas definiremos primero, de forma sencilla y general, qué la estructura es un conjunto de partes unidas entre sí que forman un cuerpo, una forma o un todo, destinadas a soportar los efectos de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo. Se considera una estructura metálica cuando más del 80% de los elementos o sus partes son de acero y se le puede llamar estructura de acero, además debe de cumplir las siguientes condiciones de acuerdo a Area Tecnológica (2022):

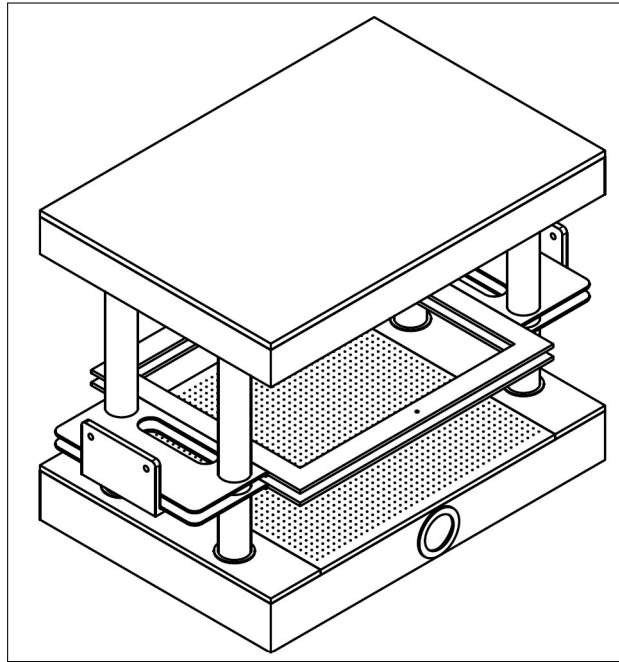
- Que sea rígida: Que la estructura no se deforme al aplicar las fuerzas sobre ella.
- Que sea estable: Que no vuelque.
- Que sea resistente: Que al aplicarle las fuerzas, cada uno de los elementos que la forman sean capaces de soportar la fuerza a la que se verán sometidos sin romperse o deformarse.

Al ser un equipo de laboratorio, la estructura debe ser de dimensiones acordes a su aplicación, sin descuidar una correcta distribución de fuerzas en el mismo, algunas de las alternativas para su fabricación son: acero estructural, aluminio estructural, polímeros de ingeniería, bronce, entre otros.

Para Forero Lopez y cols. (2018), los materiales que mejor se acomodan a los parámetros de diseño establecidos son los metales; en especial el aluminio por su fácil manejo, resistencia y esbeltez, por ende lo sugiere como material de construcción de la estructura y algunas partes móviles, usando como métodos de unión algunos adhesivos estructurales, así como elementos en polímero de ensamble a presión, consiguiendo la rigidez y estabilidad necesaria.

Figura 5.4

Boceto de la máquina termoformadora.



Nota: En la Figura se puede apreciar el diseño de máquina termoformadora y los elementos que la conforman.

5.4.2. Diseño electrónico

En el diseño electrónico de una máquina termoformadora se necesita de elementos como: sensores, módulos, y de resistencias eléctricas. Con el uso de los elementos mencionados se diseña un circuito que garantice un óptimo funcionamiento de la máquina. Además, el diseño electrónico se debe complementar con uno de control para así manejar las distintas variables, garantizando el correcto funcionamiento (Forero Lopez y cols., 2018).

5.4.2.1. Sistema de Calentamiento

Una de las etapas más importantes en proceso de termoformado es el calentamiento de la lámina hasta lograr que se ablande para de esta forma darle su posterior moldeado. Las formas que se tiene para calentar la lámina son las siguientes:

- **Calentamiento por contacto:** Es un método de calentamiento rápido utilizado en la producción en masa de artículos pequeños y delgados. Este método consiste en colocar la lámina de plástico en contacto con una placa de metal caliente Rojas y Nelson (2019).
- **Calentamiento por inmersión:** Es un método que consiste en sumergir la lámina de plástico en algún líquido que transfiera el calor de una manera uniforme y rápida. Es

complejo para la producción de piezas grandes debido a su limpieza y manipulación Rojas y Nelson (2019).

- **Calentamiento por convección:** Es un método que hace uso de un horno en donde fluye aire caliente que se distribuye de manera uniforme a lo largo de la lámina de plástico, debido a este calentamiento uniforme estos hornos son muy utilizados, puesto que permiten secar cualquier clase de humedad que se pueda encontrar en el material. Además, estos hornos tienen un gran margen de seguridad con respecto a las variaciones en el tiempo de los ciclos de termoformado Rojas y Nelson (2019).
- **Calentamiento por radiación:** Es un método que proporciona un calentamiento instantáneo en la lámina de plástico. Este proceso se produce por un intercambio de energía entre una superficie caliente y la lámina de plástico fría. El tiempo de calentamiento se da en tan solo segundos, debido a la característica de absorción del plástico, pero para que esta radiación sea absorbida por el plástico la energía emitida por el calentador debe coincidir con las características de absorción del mismo, para lograr reblandecerlo. La superficie de estos calentadores por radiación puede estar entre los 315 °C a 705 °C Rojas y Nelson (2019).

Independientemente, el método de calentamiento que se utilice, es necesario el estudio de los distintos mecanismos de calor, tales como la conducción, la convección y la radiación.

- **Transferencia de calor por conducción:** Según Cengel y Ghajar (2007), la conducción, la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. En donde, La razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa.
- **Transferencia de calor por Radiación:** Los cuerpos tienen la capacidad de absorber o transmitir radiación en diversos grados, de acuerdo a la característica de los distintos materiales. Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa. La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en K o R) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann Cengel y Ghajar (2007).

$$Q_{Rad} = \sigma A_s (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (5.8)$$

Donde:

Q_{Rad}	Cantidad de calor máxima transferida por radiación
σ	Constante de Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K$
A_s	Área de superficie
T_s	Temperatura superficial
T_{alr}	Temperatura alrededor

La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama cuerpo negro y la radiación emitida por este es la radiación del cuerpo negro Forero Lopez y cols. (2018).

La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa por la ecuación 5.9:

$$Q_{Rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (5.9)$$

En donde ε es la emisividad de la superficie. La emisividad cuyo valor está en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

- **Transferencia de calor por convección:** La transferencia de calor por convección se clasifica en: Convección forzada y natural; En la primera el flujo es causado por medios externos, y en la segunda el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido Forero Lopez y cols. (2018).

La transferencia de calor por convección de acuerdo a Cengel y Ghajar (2007) se obtiene de la ecuación 5.10:

$$Q_{total} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (5.10)$$

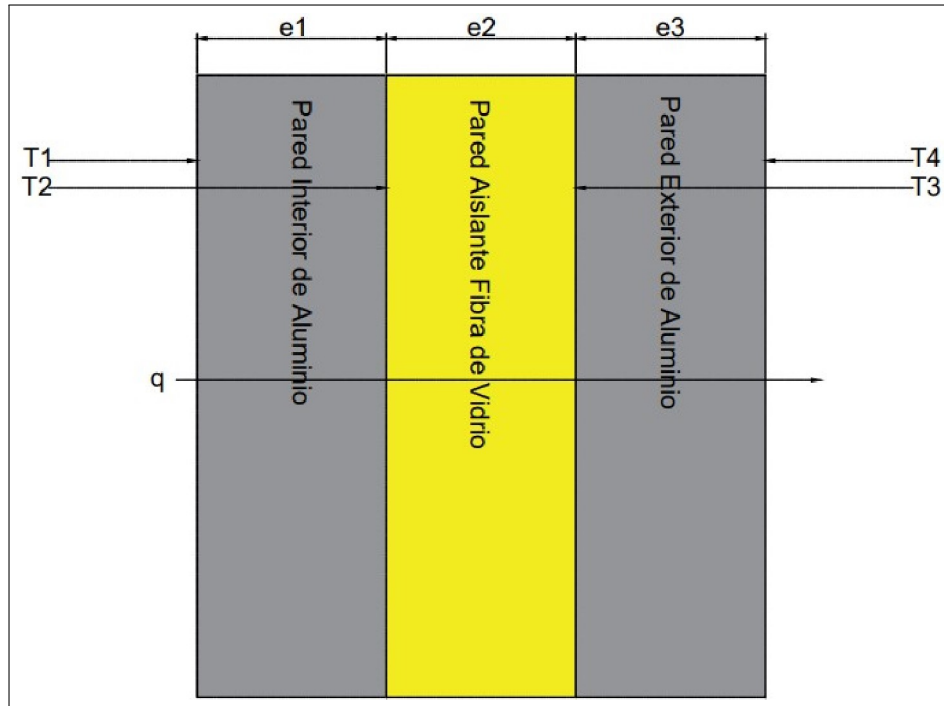
Donde:

Q_{total}	Cantidad de calor máxima transferida total
Q_{conv}	Cantidad de calor máxima transferida por convección
Q_{Rad}	Cantidad de calor máxima transferida por radiación

- **Temperaturas en las paredes del sistema de calentamiento:** Una parte del calor emitido por el calentador se propaga a través de las paredes de la base de calentamiento. Si se considera este flujo de calor en estado estable, el mismo será igual a través de todas las paredes de la base que sostiene a la fuente de calor, siempre y cuando exista un buen contacto entre las superficies. En la Figura 5.5 se puede observar un esquema de las paredes del sistema de calentamiento (Calle Cabrera y cols., 2017).

Figura 5.5

Esquema de las paredes de la base superior que sostiene la fuente de calor.



Nota: En la Figura se observa el esquema de las paredes que rodean la fuente de calor ubicada en la base superior del equipo de termoformado (Calle Cabrera y cols., 2017).

T1, T2, T3 y T4 son temperaturas que corresponden a la pared interior y exterior tanto de aluminio como de aislante térmico que conforman la base superior en donde se encuentra ubicada la fuente de calor. De la misma forma, e1, e2, e3, e4 corresponden a los distintos espesores que conforman las paredes de la base superior.

Las temperaturas y espesores anteriormente mencionados se determinan mediante la siguiente expresión:

$$q = \frac{T_i - T_f}{\frac{e}{k \times A_p}} \quad (5.11)$$

Donde:

q	Flujo de calor
T_i	Temperatura Inicial
T_f	Temperatura Final
e	Espesor del material
k	Coefficiente de conductividad térmica del material
A_p	Área de la pared

En la parte exterior del sistema de calentamiento existe una diferencia de temperaturas entre la temperatura ambiente del aire y la temperatura de la pared exterior. En consecuencia, esto causa movimiento del aire en las cercanías de la pared produciendo el efecto de convección libre (Calle Cabrera y cols., 2017).

El flujo de calor del aire se determina por la siguiente expresión:

$$q = \frac{T_4 - T_{amb}}{h_c \times A_p} \quad (5.12)$$

Donde:

q	Flujo de calor
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_4	Temperatura de la pared exterior
h_c	Coefficiente de convección del material
A_p	Área de la pared

El coeficiente de convección del aire se lo puede determinar a partir de la ecuación siguiente expresión:

$$h_c = \frac{Nusselt \times k_{air}}{L} \quad (5.13)$$

Según (Icropera, 2007) el número de Nusselt se encuentra expresado por:

$$Nusselt = 0.68 + \frac{0.67 \times (G_r \times P_r)^{1/4}}{[1 + (\frac{0.492}{P_r})^{9/16}]^{4/9}} \quad (5.14)$$

Donde:

G_r	Número de Grashof
P_r	Número de Prandtl

Finalmente, el número de Grashoft, esta dado por la siguiente expresión:

$$G_r = T_{film} \times \beta \times \frac{L^3 \times \rho_{air}^2 \times g}{v^2} \quad (5.15)$$

Donde:

T_{film}	Temperatura de película
β	Inverso de la temperatura ambiente
ρ_{air}	Densidad del aire
g	Gravedad
v	Viscosidad cinemática

5.4.2.2. Sistema de termoformado

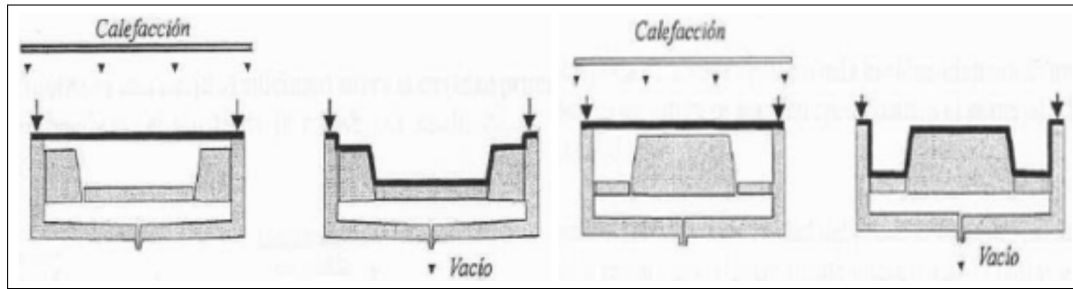
Conociendo que el proceso de termoformado consiste en calentar y reblandecer una hoja de cualquier material termoplástico y someterla a que adopte la configuración del molde correspondiente para así, obtener un producto casi terminado con una morfología particular. A veces será necesario utilizar una fuerza externa para darle forma a una hoja plana en otra forma diferente y que se le obligue a que copie todo el contorno y los detalles del molde. El nivel de energía o gasto de esta fuerza debe ser ajustable para que la hoja de plástico pueda ser fácilmente obligada a adoptar otra forma Plastiglas de México (2012). Los factores indicados a continuación, pueden marcar una diferencia en la selección de la fuerza de formado:

- Las limitaciones intrínsecas de cada material termoplástico.
- La construcción y material del molde.
- El equipo de termoformado disponible.

Antes de seleccionar el tipo de sistema de formado que se desea utilizar es muy importante distinguir entre moldes, hembras y machos. Un molde hembra tiene cavidad cóncava, mientras que un molde macho tiene una forma convexa. Ambos tipos se usan en termoformado. En el caso del molde macho, la lámina caliente recubre la forma convexa (Ver Figura 5.6), y se usa presión negativa o positiva para forzar al plástico contra la superficie del molde (Luís y Fabián, 2015).

Figura 5.6

Tipos de moldes para el termoformado.



Nota: En la Figura se observa el molde hembra a la izquierda y el molde macho a la derecha (Luís y Fabián, 2015).

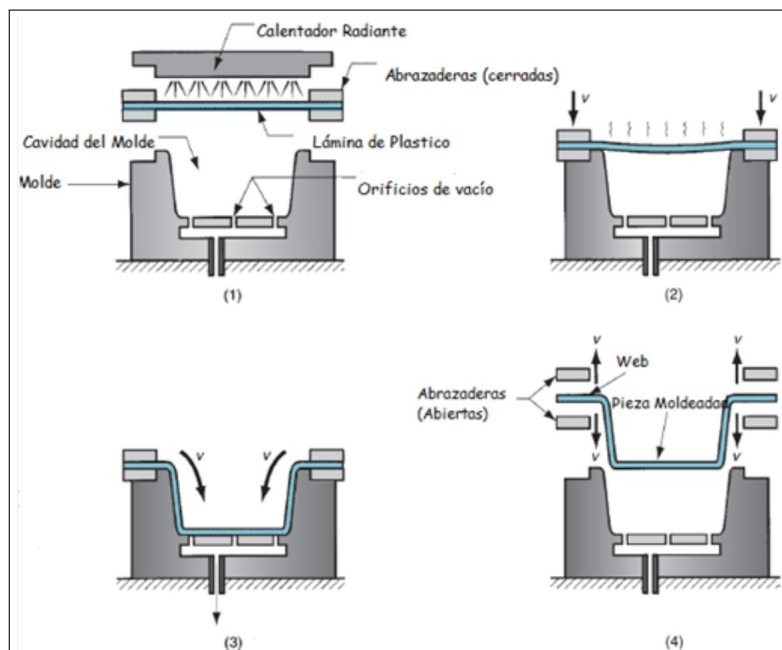
Según el producto que se desee conseguir, algunos métodos de formado son:

- **Termoformado al vacío**

La Figura 5.7 indica el proceso asistido por un sistema de vacío que genera una presión de aire negativa dentro de una cámara, para ejercer fuerza sobre el plástico, de tal forma que el mismo quede adherido sobre los contornos del molde o perfil (Viteri, Nicolás, Salazar Martínez, y Figueroa Montiel, 2021).

Figura 5.7

Fases del proceso de termoformado al vacío.



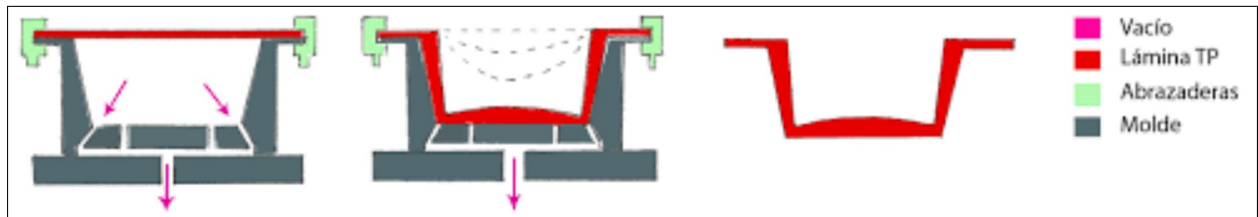
Nota: En la Figura se observa el proceso de termoformado al vacío, en un tipo de molde hembra (Viteri y cols., 2021).

■ Termoformado con aire a presión

Es el proceso en el cual una lámina termoplástica precalentada se sopla contra un molde hembra. Este proceso utiliza altas presiones, por lo general de tres a cuatro atmósferas, como se observa en la Figura 5.8 (Luís y Fabián, 2015).

Figura 5.8

Proceso de termoformado a presión.



Nota: En la Figura se observa el proceso de termoformado a presión, en un tipo de molde hembra (Luís y Fabián, 2015).

El equipo de formado a presión debe ser más fuerte que el de formado a vacío, igualmente deberá contar con tanque similar para el compresor. La tubería no requiere de especificaciones estrictas, ya que la caída de presión es despreciable. Algunas veces será necesario incorporar calentadores al sistema de aire que ayudarán en grandes sopladors, que deberán permanecer calientes hasta que la parte se forme en el molde (Plastiglas de México, 2012).

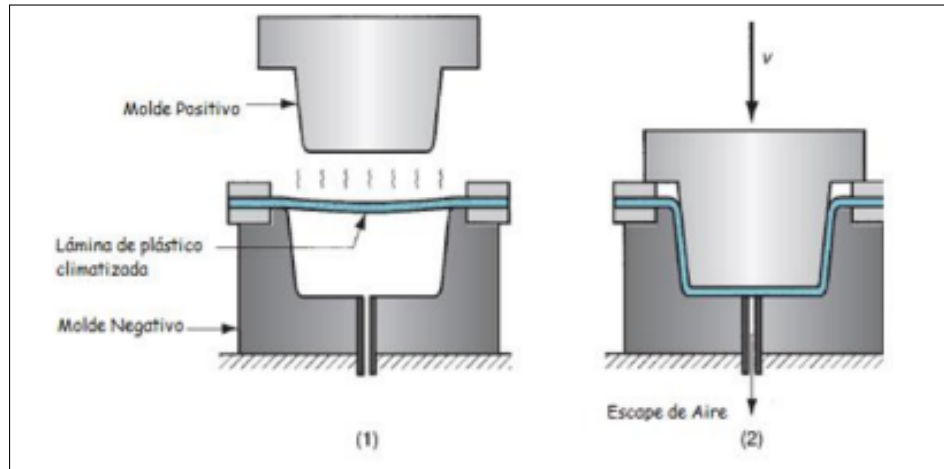
De ser posible, es también necesario contar con filtros para eliminar el agua que tiende a condensarse en el sistema y que a la larga puede corroer el equipo, además de que combinados con partículas del aire podrán tapar los orificios de ventilación en los moldes. Las ventajas de este método son: mejoras en las tolerancias dimensionales, la velocidad de formado se puede incrementar considerablemente, así como una mejor definición de los detalles finos (Plastiglas de México, 2012).

■ Termoformado con ayudas mecánicas

Este método usa un par de moldes (macho y hembra) como se observan en la Figura 5.9 que se aplican contra una lámina de plástico caliente, forzándola a asumir su forma. En el método de formado mecánico puro no se usa vacío ni presión de aire (Luís y Fabián, 2015).

Figura 5.9

Termoformado con ayudas mecánicas.



Nota: En la Figura se observa el proceso de termoformado con ayuda mecánica (Luís y Fabián, 2015).

La presión que se ejerce entre los moldes provoca que entre estos y la hoja quede aire atrapado que deberá ser removido para una buena configuración de la pieza. Esto se puede lograr barrenando uno o los dos moldes en las zonas donde se detecte la anomalía. Este método sofisticado de termoformado no debe ser empleado en la totalidad de la configuración del molde, estando limitado su uso a solo algunas partes del molde (Plastiglas de México, 2012).

Se plantea usar un sistema de formado al vacío, debido a su versatilidad, economía y eficiencia.

5.4.2.3. Sistema motriz

Es necesario que el sistema pueda permitir el desplazamiento de la lámina de plástico, existen varios mecanismos y formas que varían según las cargas, direcciones del movimiento y la frecuencia de trabajo. A continuación se tienen algunos mecanismos que se podrían usar:

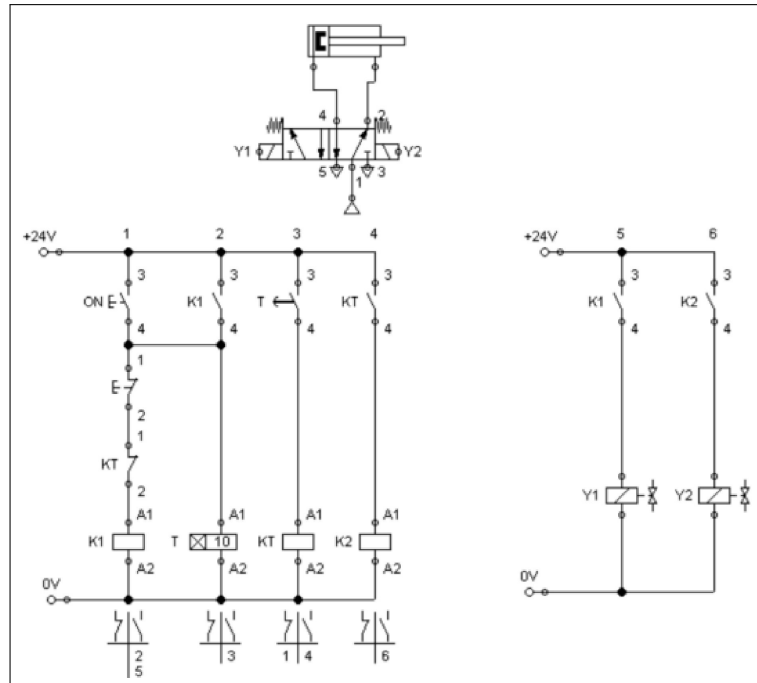
- **Actuadores electro neumáticos**

Los actuadores electro neumáticos se basan en el control de componentes neumáticos por medio de impulsos eléctricos (ver Figura 5.10), por lo general constan de un pistón neumático y un diagrama eléctrico de control. En el caso de la máquina termoformadora el sistema electro neumático es el encargado de mover al marco porta láminas hacia

el sistema de calentamiento y posteriormente hacia el sistema de vacío que permite el moldeo.

Figura 5.10

Actuador electro neumático.



Nota: Ejemplo de circuito electro neumático para máquina termoformadora (Viteri y cols., 2021).

Figura 5.11

Servomecanismos.



Nota: Máquina termo formadora que usa servomecanismo, para el movimiento del marco porta laminas, controlada por arduino (Making, 2013).

■ Servomecanismos

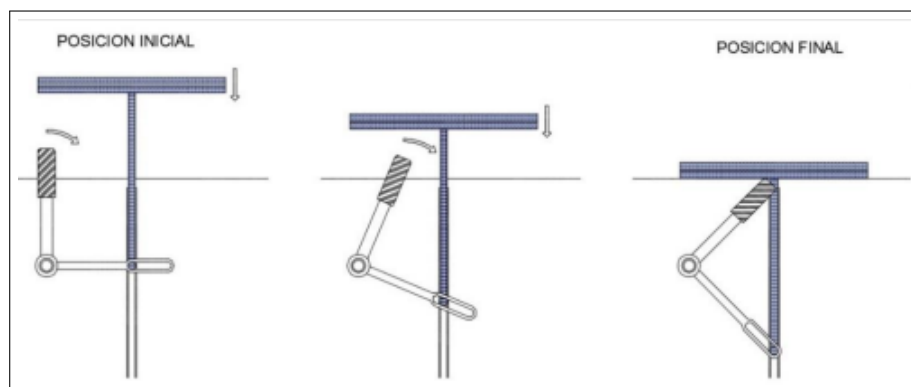
Es un sistema realimentado donde su salida es una variable mecánica de posición, velocidad o aceleración, etc. Estos son empleados en sistemas mecánicos de precisión que permiten mover el marco porta láminas para su calentamiento y formado, como se observa en la Figura 5.11 (Paredes García, 1992).

■ Palancas y bielas

Este tipo de sistemas debe transformar un movimiento circular en un movimiento lineal, por lo general se los coloca al costado del marco de sujeción para permitir su movimiento (Calle Cabrera y cols., 2017). La Figura 5.12 presenta la secuencia a seguir del movimiento.

Figura 5.12

Palanca y biela.



Nota: Secuencia del mecanismo para el movimiento del marco porta lámina (Calle Cabrera y cols., 2017).

5.4.3. Diseño de Control

Para el proceso de termo formado, el control de la máquina se puede ejecutar de forma manual, semiautomática y automática, por medio de pulsadores, relés térmicos, controladores electrónicos, etc. Las alternativas que se tienen son:

5.4.3.1. Control manual

Involucra a una persona capacitada de la mejor manera para llevar a cabo acciones que permiten el correcto funcionamiento de la máquina para realizar el trabajo. En este tipo de control, el proceso se vuelve dependiente a factores humanos tales como fatiga, estados de ánimo, actitud, aptitud, entre otros. El control manual incluye distintos tipos de

accionamientos según la tarea a realizar: Dispositivos eléctricos como pulsadores, selectores de giro; para la resistencia eléctrica y la alimentación del sistema; válvulas neumáticas o hidráulicas operadas manualmente por medio de palanca para las partes móviles del conjunto, así como pedales o mecanismos para realizar esa misma acción (Forero Lopez y cols., 2018).

5.4.3.2. Controladores automáticos

Todo sistema de control automático presenta cuatro componentes básicos: sensor o elemento primario, transmisor o elemento secundario, controlador y elemento final de control (válvulas de control, motores, bombas de velocidad variable, etc.). Dichos componentes realizan las tres operaciones básicas de los sistemas de control: Medición de alguna variable (generalmente se realiza combinando sensor y transmisor), Decisión (la toma el controlador basado en la señal tomada del sensor) y la acción cuya ejecución está determinada por la decisión tomada por el controlador y se da por medio de los elementos finales de control (Forero Lopez y cols., 2018).

Sin importar el método de control que se escoja, hay que tomar en cuenta que el sistema eléctrico, y principalmente, el sistema de control, son fundamentales para la actuación autónoma y la programación de parámetros de procesamiento, según las características del material (Arbeláez-Toro y cols., 2019).

6. Marco metodológico

6.1. Metodología de la Investigación

La investigación desarrollada presentó un:

6.1.1. Enfoque:

Cuantitativo: Con análisis de datos como temperatura, plastificación de las planchas de polímero, resistencias mecánicas de flexión.

6.1.2. Tipo:

Básica: Analizó conceptos de transferencia de calor de un emisor doméstico hacia una lámina polimérica en un sistema abierto.

Aplicada: A la industria de producción de pequeñas piezas de plástico y en laboratorios aplicado como material didáctico en algunas de las prácticas de los estudiantes.

6.1.3. Alcances:

Explorativo: Identifica la manera en la que opera la máquina termoformadora en ambientes industriales y educativos.

Descriptivo: Aplica conceptos de termodinámica; y conocimientos en resistencia de materiales para la construcción de la máquina termoformadora.

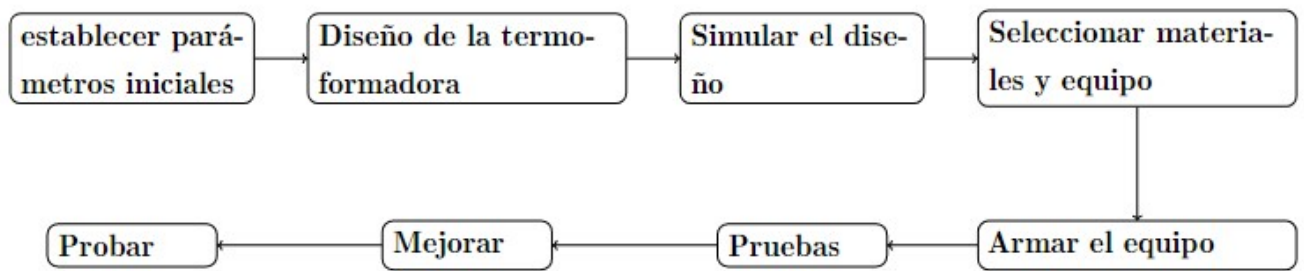
Explicativo: Indica los defectos de termoformado de acuerdo a las temperaturas de conformación y el control de las mismas de acuerdo a las etapas del proceso.

6.2. Metodología del proceso

La Figura 6.1 presenta el proceso de investigación e implementación para desarrollar el trabajo de titulación, en primer lugar se establecen los parámetros iniciales de la máquina de termoformado, posteriormente se realizará el diseño del equipo en Autodesk Inventor, para validarlo con una simulación con el software Ansys Workbench por lo cual previamente seleccionó los materiales adecuado. Posteriormente se someterá al equipo a pruebas y posibles mejoras.

Figura 6.1

Método del proceso



Nota: La Figura presente muestra el método de proceso que se llevara a cabo.

6.3. Establecimiento de los parámetros iniciales para el diseño mecánico y electrónico de la máquina termoformadora

A continuación se presentan los parámetros considerados para el diseño de la máquina termoformadora, el orden de presentación no indica la importancia, para el diseño todos los factores son considerados fundamentales para cumplir con el objetivo.

6.3.1. Parámetros mecánicos:

A continuación se presentan de forma detallada los parámetros mecánicos considerados para el diseño de la máquina termoformadora:

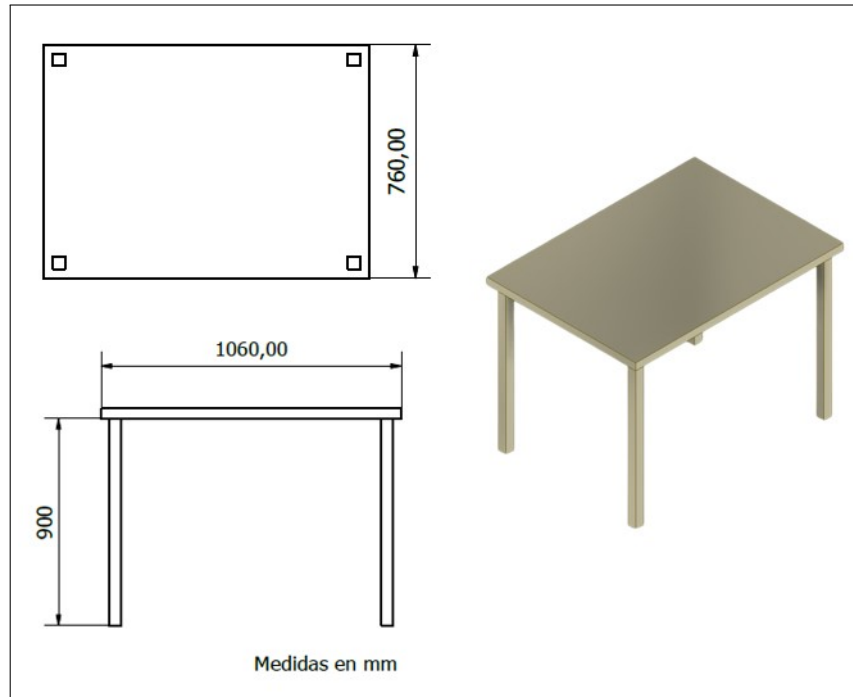
6.3.1.1. Dimensionamiento de la máquina termoformadora

Para el diseño de la máquina termoformadora se consideró que su funcionamiento es para un laboratorio de enseñanza, por lo tanto, las dimensiones tienen una restricción por el espacio físico donde se lo va a colocar.

Las dimensiones de la mesa donde se coloca el equipo está condicionado de acuerdo al espacio físico disponible y a la postura de operación de la máquina que se profundiza más adelante en parámetros ergonómicos. El diseño de la mesa puede variar de acuerdo a las necesidades del laboratorio, lo que se debe de conservar es la medida del alto de la misma de acuerdo a las normativas de seguridad y operación.

Figura 6.2

Mesa para el equipo de termoformado



Nota: En la Figura se observa la mesa metálica donde se colocará el equipo de termoformado.

Las dimensiones del equipo de termoformado dependen del espacio disponible, entonces debido a las dimensiones de la mesa; las medidas consideradas para el equipo son:

- Ancho: 250 milímetros
- Largo: 362 milímetros
- Alto: 289 milímetros

6.3.1.2. Materiales de la máquina termoformadora

Para el diseño de la máquina termoformadora se consideró el material a utilizar en cada uno de los elementos principales que conforman su estructura, de acuerdo a sus propiedades mecánicas y dimensiones comerciales disponibles.

A continuación se describe cada uno de los elementos mecánicos con su función y propiedades requeridas, además la tabla 6.1 que presenta los principales materiales propuestos para la construcción de los elementos mecánicos y que serán base para los cálculos de la evaluación mediante una simulación.

Tabla 6.1

Materiales principales de la máquina termoformadora

Denominación	Descripción	Cantidad	P. Unitario	P.Total
Bases	Aluminio Prodax 240x360x6 mm	3	30\$	90\$
Columnas	Acero Inox.304 Ø 24.5 mm x 6m x 1.5 mm	1	36.75\$	36.75\$
Marco portalamina	Acero Inox.304 6m 3/4x1/8 in	1	18.65\$	18.65\$
Aislante	Celorón 3.3m 100 kg	1	3.50\$	3.50\$
Plancha troquelada	Aluminio Prodax 250x254x6 mm	1	10\$	10\$

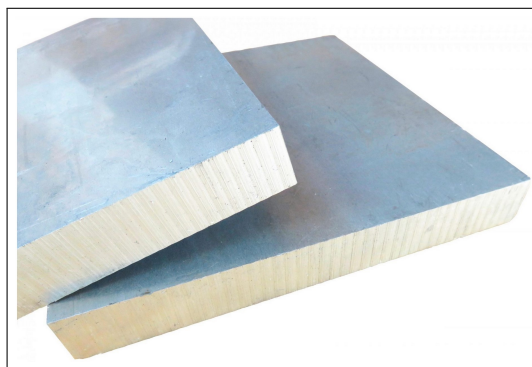
Nota: La Tabla presenta la cantidad de materiales con sus medidas y sus costos unitarios y total. Las cotizaciones fueron obtenidos en El Acero, Aluminox y Polinox que son distribuidores en la ciudad de Cuenca.

■ **Bases**

El material seleccionado para las bases es el aluminio prodax debido a su manejo, su resistencia en relación con su peso, esbeltez y considerando su buen acabado superficial (Dismetal, 2022; Forero Lopez y cols., 2018). La Figura 6.3 se observan placas de aluminio comerciales.

Figura 6.3

Placas de aluminio para bases.



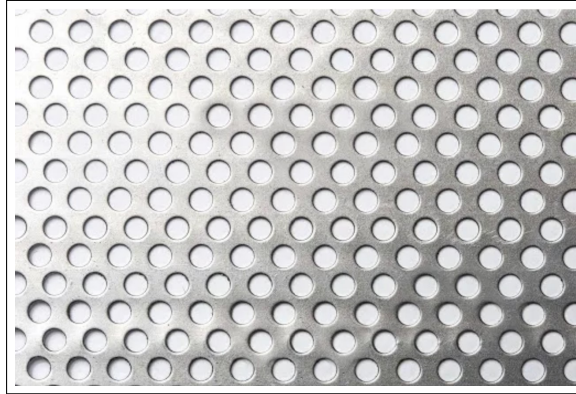
Nota: En la Figura se observa las placas de aluminio para el diseño de las bases y la caja de calentamiento (Dismetal, 2022).

El diseño de la caja superior de calentamiento donde se coloca la lámpara de calor también está estructurado de aluminio con un aislamiento de fibra o lana de vidrio, como se ve en la Figura 6.18. Por otra parte, el diseño de la caja inferior, en donde se encuentra el sistema de vacío, también se encuentra estructurado de aluminio, la parte superior de la caja consta de una lámina metálica troquelada con punzones

redondos de 0.5 mm y una distancia entre centros de 6 mm como se ve en la Figura 6.4, esto para permitir el paso de aire de succión al momento de realizar el termoformado (García Reino, 2016).

Figura 6.4

Lámina de aluminio perforada.



Nota: La lámina metálica troquelada con punzones redondos que se indica la figura permite el paso de aire de succión del sistema de vacío, para que se pueda llevar a cabo el termoformado de las piezas plásticas (alfer, 2022).

■ **Columnas**

En el diseño de esta estructura, que es el soporte principal de todas las partes que constituyen el equipo, se utiliza tubos redondos de acero inoxidable, puesto que son ideales para todas las aplicaciones estructurales donde se requiera una mayor fuerza y resistencia (Octal, 2022).

Figura 6.5

Tubo de acero inoxidable 304.



Nota: En la Figura se observa los tubos de acero inoxidable utilizados como columnas guías en la máquina termoformadora (Octal, 2022).

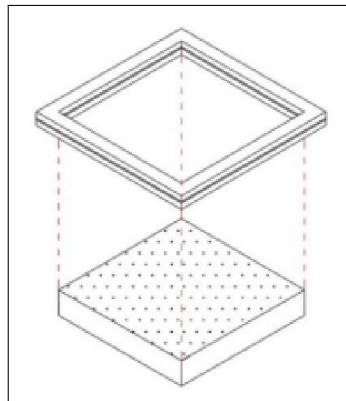
La tubería de acero inoxidable es de sección cilíndrica, es de tipo hueco y de longitudes comerciales hasta de seis metros, es ampliamente utilizada en la industria petrolera, química, médica, alimentaria, maquinaria ligera, equipos, aparatos y piezas estructurales, etc (Octal, 2022).

- **Marco porta láminas**

Esta parte del equipo consta de un marco que tiene una parte superior escalonada donde se coloca la lámina de plástico para que se desplace hacia arriba para el calentamiento y hacia abajo para el formado por vacío (Calle Cabrera y cols., 2017).

Figura 6.6

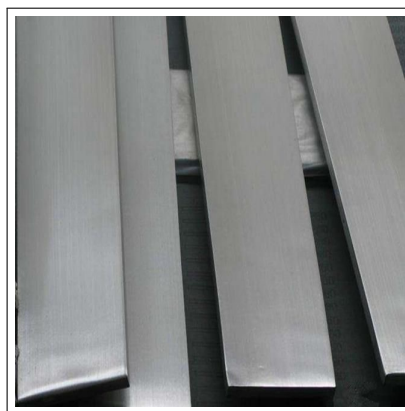
Esquema del marco móvil y la base de vacío



Nota: Las dimensiones del marco móvil depende del tamaño de la mesa de vacío (Calle Cabrera y cols., 2017).

Figura 6.7

Platinas de acero inox. 304 para el marco móvil



Nota: El acero inoxidable plano 304 se utiliza para los marcos móviles por su peso y resistencia, tiene una gama extensa de dimensiones comerciales (Hui, 2022).

Las platinas de acero plano inoxidable 304 es la forma más económica, que es ideal para todas las aplicaciones donde se requiere fuerza y resistencia. Este producto se ha utilizado en la fabricación de estructuras de acero, fabricación de maquinaria, industria automotriz, maquinaria de minería, maquinaria de elevación y otros materiales industriales (Hui, 2022).

6.3.2. Parámetros Electrónicos:

6.3.2.1. Materiales que conforman la parte electrónica de la máquina termoformadora

Para el diseño electrónico del equipo se consideró utilizar materiales que se presentan en la Tabla 6.3 considerando como prioridad la calidad de los mismos, siendo los principales los que se presentan en la Tabla 6.2:

Tabla 6.2

Materiales electrónicos para la máquina de termoformado.

Denominación	Descripción	Cantidad	P. Unitario	P.Total
Fuente de calor	Lampara IR de cerámica 122x122x25 mm	1	16\$	16\$
Sensor de temperatura	Termocupla tipo k	1	8.50\$	8.50\$
Control de temperatura	Controlador PID REX-C100	1	40\$	40\$
Movimiento de Portalamina	Motor Nema 23	2	40\$	80\$
Guía de movimiento	Actuador lineal de carrera efectiva	2	164\$	328\$
Fuente de alimentación	Voltaje de salida: 12V DC, Corriente Max.: 5A DC	1	13.08\$	13.08\$
Microcontrolador	microcontrolador esp32	1	28\$	28\$
Driver	TB6600	2	24\$	48\$

Nota: La Tabla indica los elementos electrónicos, que mejor se adecuan al diseño de la máquina de termoformado y garantizando su calidad.

■ Fuente de calor

El emisor de calentador infrarrojo es eficiente y robusto, lo que proporciona radiación infrarroja de onda larga. El calentador eléctrico de cerámica infrarrojo funciona en un rango de temperatura de 10 °C a 900 °C con una producción de longitudes de onda infrarrojas entre el rango de 2 - 10 micras, considerando que viene en una gran gama de medidas y formas comerciales que facilitan su uso. Comúnmente el calentador infrarrojo se utilizan en una amplia gama de procesos industriales como calentadores para termoformado, calentadores para curado de diferentes procesos, impresión y secado de pintura, siendo últimamente aplicados y de manera muy efectiva como calentadores infrarrojos para exteriores y saunas infrarrojas que tienen una gran acogida por su bajo consumo energético y durabilidad (Alibaba, 2022). La Figura 6.8 presenta una lámpara infrarroja utilizada para calentamiento de láminas poliméricas,

Figura 6.8

Lámpara infrarroja cerámica para termoformado.



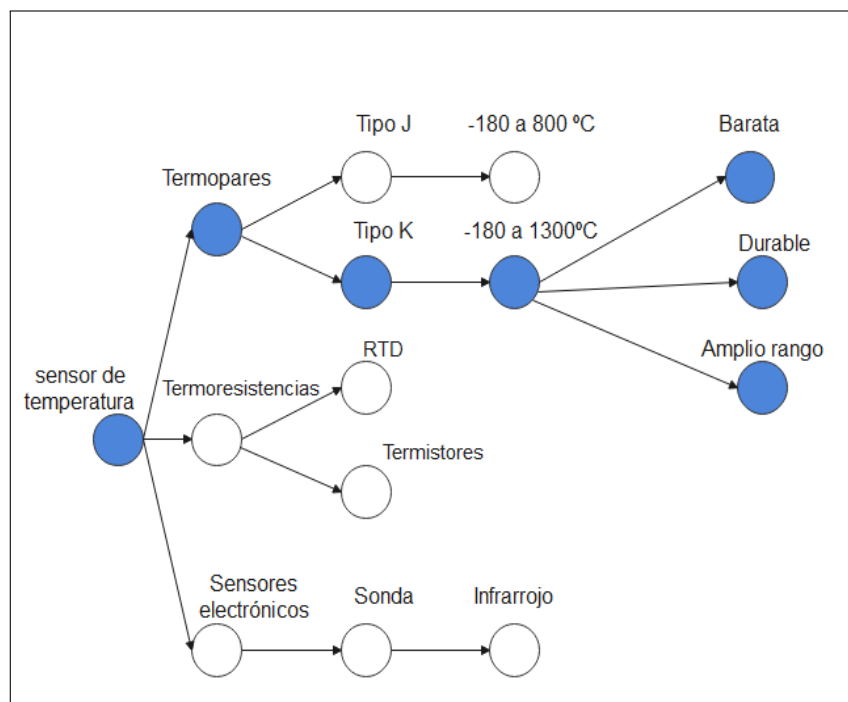
Nota: Lámpara infrarroja cerámica ideal para termoformado (Alibaba, 2022).

■ **Sensor de temperatura**

Para la elección del sensor de temperatura se procede a realizar un árbol de decisiones, con la intención de escoger el sensor que mejor se acomode a nuestro equipo de termoformado:

Figura 6.9

Árbol de decisiones sensor de temperatura.



Nota: El Árbol de decisiones nos permite escoger la mejor opción para la elección de nuestro sensor de temperatura.

- **Termocupla**

Las termocuplas o también conocidas como termopares, consisten en dos conductores metálicos con diferentes propiedades que forman un circuito, cuando estos conductores se encuentran sometidos a diferentes temperaturas se emite una señal eléctrica a través del circuito.

Posteriormente, la señal eléctrica es enviada a un controlador que se encarga de acondicionar dicha señal para visualizarla en un formato de temperatura y utilizar dicho valor para el control de la lámpara térmica (Pérez Colibrí y Vásquez Vásquez, 2021).

De acuerdo al árbol de decisiones la termocupla más adecuada es la de tipo k como se observa en la Figura 6.10.

Figura 6.10

Termocupla tipo k.



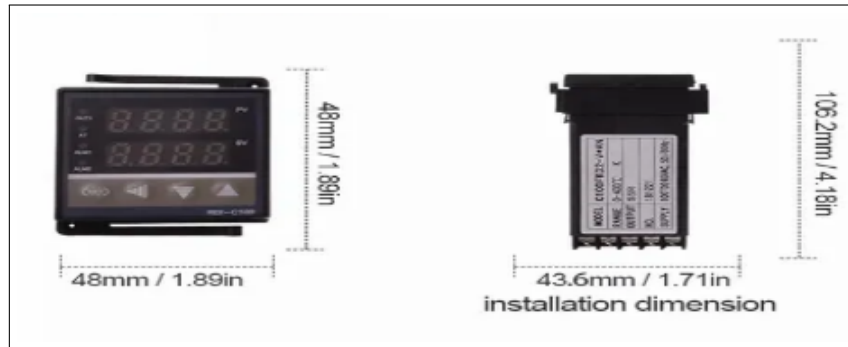
Nota: En la industria el termopar es por mucho el sensor de temperatura más usado por diferentes razones, como las más importantes se puede mencionar su bajo costo, el amplio intervalo de temperatura de uso, su robustez, la relativa buena exactitud y rápida respuesta a cambios de temperatura (Luís y Fabián, 2015).

- **Control de temperatura REX-C100**

Considerando que la lámpara IR de material cerámico puede alcanzar un rango de temperatura que va desde los 10 °C hasta los 900 °C, se debe hacer uso de un controlador de temperatura que garantice que esta temperatura sea la adecuada para lograr el termoformado de la lámina PVC y en consecuencia no dañe a la misma, como el de la Figura 6.11 (Pito Terán y Molina Negrete, 2008).

Figura 6.11

Controlador de temperatura REX-C100.



Nota: El controlador de temperatura REX-C100 se encuentran entre los más precisos de la industria y combinan una gran cantidad de funciones avanzadas sin dejar de ser fácil de configurar y utilizar (Taxnele, 2022).

- **Motor NEMA 23 para el movimiento del porta lámina**

Los motores paso a paso son motores de control que cuentan con una gran precisión, pueden encontrarse en impresoras de escritorio, plotters, impresoras 3D, fresadoras CNC y lo que sea que requiera preciso control de posición. Los motores paso a paso son un segmento especial perteneciente a los motores Brushless, que están contruidos específicamente para aplicaciones de mantenimiento de altos niveles de torque. Este torque otorga la capacidad de moverse mediante pasos entre posiciones, lo que resulta en un sistema de posicionamiento simple que no requiere de un codificador, lo que hace que los controladores de motores paso a paso sean muy simples de construir y usar como el de la Figura 6.12 (MCI, 2022).

Figura 6.12

Motor NEMA 23.



Nota: Motor a utilizar en el sistema de movimiento del marco portalámina (MCI, 2022).

- **Driver TB6600**

El driver TB6600 mostrado en la Figura 6.13 hace que la interfaz con un microcontrolador sea muy fácil, ya que solo necesita dos pines para controlar tanto la velocidad como la dirección del motor de pasos Nema 23 (Electrogeek, 2022).

Figura 6.13

Driver TB6600.



Nota: La tarjeta con el integrado TB6600 es un controlador de motores. Funciona al proporcionar un pulso digital de trabajo y dirección. Podemos usar la tarjeta para el control de un motor a pasos como el NEMA 23 (Amazon, 2022).

- **Guía lineal DTX1204J-100**

La guía lineal DTX1204J-100 es una estructura semiselladora, ancho del cuerpo de 42 mm, alta estabilidad, estructura compacta, función de versatilidad, adecuada para un entorno de trabajo normal.

Figura 6.14

Actuador lineal.



Nota: Sistema para el movimiento del marco portalamina, mediante un actuador lineal con tornillo de bolas (Amazon, 2021).

- **Fuente de alimentación** Para el diseño de la máquina termoformadora se utilizó una fuente de alimentación como se indica en la Figura 6.15

Figura 6.15

Fuente AC/DC de 12v y 5A



Nota: Fuente de alimentación de 12 voltios, 5 amperios, 120w para alimentación de controladores y motores (Mercado Libre, s.f.).

6.3.3. Parámetros de vacío:

Los materiales que conforman la parte de vacío de la máquina termoformadora son la cámara de vacío y para generar él vacío se optó por una aspiradora, como se observa en la Figura 6.16.

Tabla 6.3

Materiales principales para el sistema de vacío

Denominación	Descripción	Cantidad	P. Unitario	P.Total
Vacío	Aspiradora portátil Stanley SL18910P-3	1	50\$	50\$

Nota: Sistema de vacío con el uso de una aspiradora (Savage, 2016).

- **Aspiradora**

La aspiradora es un dispositivo que genera vacío, activa un ventilador en su interior y esto genera una reducción en la presión interior haciendo que el aire ingrese por la manguera. La aspiradora es un dispositivo versátil para generar vacío ya que todos los elementos necesarios vienen incluidos en la máquina y hay gran variedad en el país. Por tal razón este mecanismo se utilizará para generar el vacío requerido por la termoformadora.

Figura 6.16

Aspiradora Stanley SL18910P-3.



Nota: Aspiradora STANLEY de 3HP para vacío (Pintulac, 2021).

6.3.4. Parámetros Ergonómicos:

Según Mata (2004):

En el proceso de diseño de cualquier máquina o equipo industrial es preciso tener en cuenta una serie de variables o criterios de diseño que permitan finalmente dar respuesta de forma satisfactoria a una necesidad humana. Desde un punto de vista ergonómico, se han de considerar aspectos como la posición del trabajador, los niveles de iluminación localizada necesarios, la amplitud de los movimientos o la temperatura de trabajo. Así pues, la variable ergonómica debe ser incorporada de manera sistemática a los protocolos de diseño.

En este contexto y de acuerdo a la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (2022):

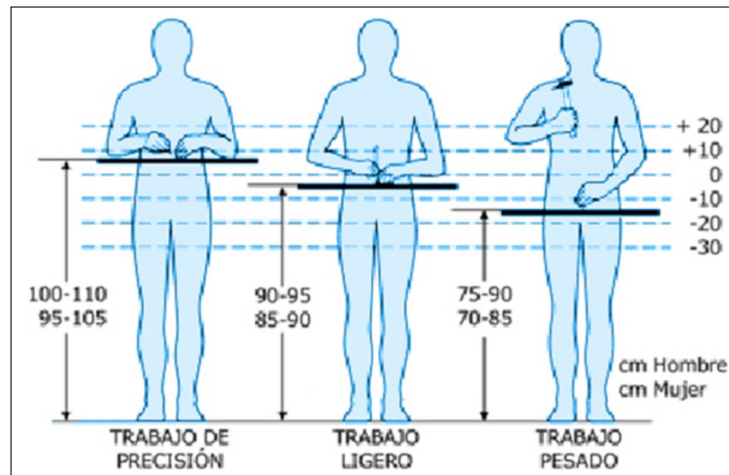
En toda tarea que implique trabajar de pie se debe adaptar el plano de trabajo en función del tipo de trabajo a realizar y la altura del propio trabajador. Se recomienda el uso de mesas regulables en altura en trabajos que por la dimensión de la pieza-equipo de trabajo y el trabajo a realizar no se adapte correctamente la tarea. Según las recomendaciones del IBV (Instituto Biomecánico de Valencia) y siguiendo la regla del codo:

1. **Para tareas de precisión**, la altura del plano de trabajo debe ser de unos 5-10 cm por encima de la altura de los codos.
2. **Para tareas de requerimiento normal (ligero)** con nivel medio de fuerza y precisión y donde se manipulen objetos no muy pesados, se suele tomar la altura de los codos menos 5-10 cm.

3. **Para tareas muy pesadas** que impliquen mover cargas o piezas pesadas, la altura del plano de trabajo debe quedar 10-30 cm por debajo del codo, así se emplea el peso de la parte superior del cuerpo y los músculos abdominales para aplicar la fuerza.

Figura 6.17

Plano de trabajo para peso ligero.



Nota: En la Figura se observa las alturas de acuerdo a las diferentes tareas a realizar, para el diseño se considera una tarea de requerimiento normal o manipulación de pesos ligeros como lo son las láminas poliméricas utilizadas en el termoformado (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2022).

Para el diseño de la máquina termoformadora se consideró, de acuerdo a Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (2022), una altura de la mesa de 90 cm, para que sumando el espesor de la base inferior con la placa perforada que realiza el vacío y la altura del modelo que definirá la forma de la lámina y se trabaje a una altura promedio de 95 cm.

Es necesario comprender que la altura definitiva dependerá del tamaño del modelo que establece la forma requerida y alcanzará una altura máxima de 5 cm y una altura promedio del operador de 1.70 m.

6.3.5. Parámetros de seguridad

La máquina se diseñó de tal manera que se toma en cuenta los accidentes que esta podría causar y de qué manera se puede intervenir para, en lo posible, eliminar este factor o controlar de la mejor manera posible de ser el caso (Viteri y cols., 2021), con la finalidad de evitar el calentamiento de las placas exteriores y posibles quemaduras al operar la máquina se consideró un aislamiento térmico y eléctrico conocido como “celorón” para evitar quemaduras

al momento de la operación y cuyas propiedades térmicas son similares a las de la lana de vidrio (Forero Lopez y cols., 2018; Pérez Ramos y Chavarro León, 2012).

Figura 6.18

Celorón como aislante para la temperatura de calentamiento.



Nota: El celoron, material a base de telas y resina fenólica por medio de compactación en caliente, es silencioso, dieléctrico y con gran resistencia al aceite, al impacto, sustancias químicas, impermeable y larga duración (La Paloma, 2023).

6.4. Propuesta del diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas

6.4.1. Análisis del sistema de calentamiento en el diseño

Para el análisis del sistema de calor se consideró primeramente la fuente de emisión, desde su selección y capacidad para posteriormente analizar el material a ser calentado para su procesamiento o termoformado considerando las variables que intervienen en cada modelo matemático que respaldan el dimensionamiento de la máquina y funcionamiento de la misma.

6.4.1.1. Fuente de calor

- **Elección de la lámpara infrarroja**

En primer lugar, el tipo de sistema de calentamiento utilizado es una lámpara cerámica que es un emisor de calor infrarrojo ideal en la aplicación de equipos de termoformado. Los calentadores IR de cerámica son altamente eficientes. Tienen un factor de emisividad $\varepsilon = 0.9$. El calefactor cerámico seleccionado para el equipo tiene un tamaño de 122 x 122 mm y una potencia de 650 [W].

El rango de temperatura de estas lámparas IR van en rangos de temperatura desde los 10 °C hasta los 900 °C, pero el control de temperatura se lo hará a un rango de

temperatura promedio de 200 °C, debido a las dimensiones del equipo y a la energía calorífica que requiere la lámina PVC para su termoformado (Slheater, 2022).

Figura 6.19

Calentador cerámico IR de 650 W.



Nota: Lámpara IR de cerámica ideal para varias aplicaciones, entre ellas el termoformado (Slheater, 2022).

- **Calor emitido de la lámpara IR**

La transferencia de calor por convección se da entre la lámpara de calor IR y aire que circulante que llega a la lámina PVC, pero también existe transferencia de calor por radiación directa entre la lámpara y el PVC. Para determinar esta transferencia de calor por radiación se utiliza la ecuación 5.9 , tomando en cuenta que la emisividad de la superficie de la lámpara es de $\varepsilon = 0.9$ y su $A_s = 0.040022984[m^2]$ de acuerdo a Inventor.

$$Q_{emitida} = 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.040022984[m^2] \times (473^4 - 422^4)$$

$$Q_{emitida} = 37.45865[W]$$

La lámpara IR transfiere por radiación 37.45865 [W] a una temperatura de 200 °C hacia la lámina PVC; sin embargo, se requiere de 308.45 [W] para que el material pueda llegar a la temperatura de termoformado. Por lo tanto, aún se necesita 266.9913 [W] para llegar a la potencia requerida. Sin embargo, tomando en consideración que la lámpara de calor suministra una potencia total de 650 [W] y no emite toda esa potencia debido a que solo el 50% de esa potencia llega al material plástico al estar en contacto únicamente la mitad inferior de la lámpara. Se tiene que la razón de transferencia de calor total de la lámpara es de 325 [W] (Brusil Arellano, 2016).

De la ecuación 5.10 se despeja Q_{conv} para obtener la transferencia de calor por convección que se da a través del aire hacia la lámina PVC.

$$Q_{conv} = Q_{total} - Q_{rad} \quad (6.1)$$

$$Q_{conv} = 325 - 37.45865$$

$$Q_{conv} = 287.54[W]$$

La lámina requiere 266.9913 W y se transmite por convección un valor de 287.54 W . Esto nos permite asegurar que la lampara IR suministra la potencia necesaria para calentar la lámina, y el restante de potencia que equivale a 20.5487 W es el que está calentando el volumen de aire existente entre la fuente de calor y la lámina PVC, con ayuda de este dato se procede a obtener la altura y el tiempo al que lámina PVC alcanzara la potencia requerida para su termoformado.

- **Temperatura de las paredes del sistema de calentamiento**

En la Figura 5.5 se puede observar un esquema de las paredes que rodean el sistema de calentamiento. En donde los datos conocidos son la temperatura del sistema de calentamiento (T_1) que es de 200 °C que equivale a la temperatura de la pared interior del sistema de calentamiento, mientras que para la temperatura de la pared exterior (T_4) se necesita que alcance los 50 °C para evitar quemaduras en los usuarios que manipulen el equipo de termoformado. Otro dato conocido es la temperatura ambiente, que es de 17 °C.

Con base en los datos que se mencionan anteriormente, se procede en primera instancia a calcular el flujo de calor (q) existente en la pared del sistema de calentamiento mediante la ecuación 5.12.

En donde el área de la pared del sistema de calentamiento es:

$$A_p = 0.122 \times 0.025 = 0.00305[m^2]$$

El coeficiente de convección del aire (h_c), está asociado al número de Nusselt, la conductividad del aire y la longitud característica de la pared (Calle Cabrera y cols., 2017).

El número de Nusselt se expresa por la ecuación 5.14 que depende del número de Grashof y Prandtl, estos últimos se determinan de acuerdo a la temperatura de

película del material que en este caso es:

$$T_{película} = \frac{T_4 + T_{amb}}{2} = \frac{50 + 17}{2} = 34 \text{ } ^\circ C = 307 \text{ } ^\circ K$$

De acuerdo a Cengel y Ghajar (2007) el número de Grashof expresado por la siguiente ecuación a una temperatura de película de 34 °C es:

$$Gr = 307 * \times 290^{-1} \times \frac{\left(\frac{0.00305}{0.9}\right)^3 \times 1.145 \times 9.8}{(1.655 \times 10^{-5})^2} = 1687.90474$$

Por otra parte, el número de Prandtl a la misma temperatura de película es:

$$Pr = 0.7268$$

Entonces, al sustituir los datos previamente calculados, se tiene que el número de Nusselt es:

$$N^{\circ} Nusselt = 0.68 + \frac{0.67 \times (1687.90474 \times 0.7268)^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{0.7268}\right)^{9/16}\right)^{4/9}} = 3.73$$

El coeficiente de convección del aire (h_c) expresado por la ecuación 5.13 es:

$$h_c = \frac{3.73 \times 0.02683}{\left(\frac{0.00305}{0.9}\right)} = 29.53 \left[\frac{W}{m^2 \times K} \right]$$

Finalmente, el flujo de calor total a través de la paredes es:

$$q = \frac{\left(\frac{323-290}{1}\right)}{29.53 \times 0.00305} = 366.39 [W]$$

El espesor de la pared interior y exterior del horno es de 5 mm y la conductividad térmica del aluminio es de 205 $\left[\frac{W}{m \times K}\right]$ y la temperatura T_1 y T_4 equivalen a 473 y 323 °C respectivamente. Entonces se tiene:

$$366.39 = \frac{\left(\frac{T_3-323}{0.005}\right)}{205 \times 0.00305}$$

Despejando T_3

$$T_3 = 324.14 \text{ } ^\circ K = 51 \text{ } ^\circ C$$

$$366.39 = \frac{\left(\frac{473-T_2}{0.005}\right)}{205 \times 0.00305}$$

Despejando T_2

$$T_2 = 471.85 \text{ } ^\circ K = 198.7 \text{ } ^\circ C$$

- **Espesor del aislante del sistema de calentamiento**

El espesor del aislante lo determinamos mediante la siguiente ecuación y con ayuda de la temperatura T_2 y T_3 calculadas previamente, teniendo como resultado:

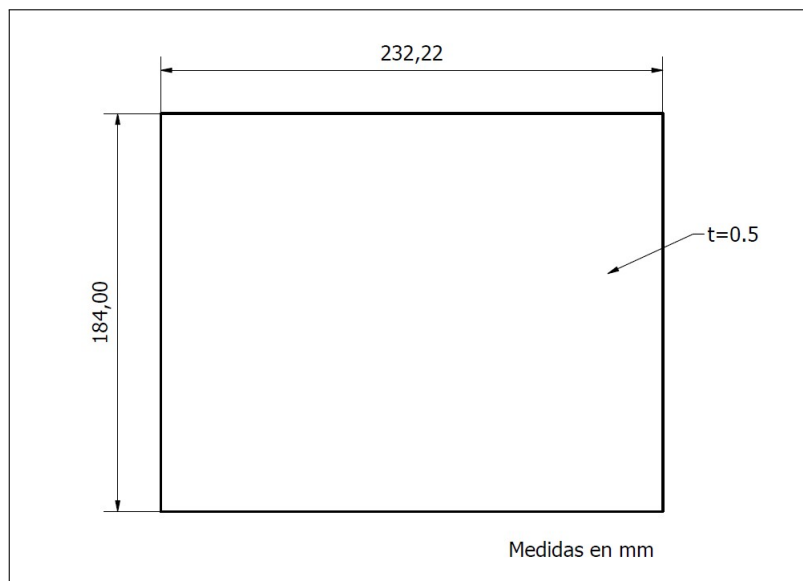
$$366.39 = \frac{\left(\frac{471.85-324.14}{e_2}\right)}{0.034 \times 0.00305} e_2 = 4[mm]$$

- **Elección de la lámina de termoformado**

Los plásticos usados para el termoformado son el poliestireno, acetato de celulosa y butirato acetato de celulosa, ABS, PVC, acrílico (polimetacrilato), polietileno y polipropileno. De todos estos materiales, los fabricantes que realizan moldes mediante el termoformado usan con frecuencia el material PVC. Este material es liviano, rígido y confiable para la producción de recipientes, las medidas se observan en la Figura 6.20. Por esta razón se hace uso de láminas de este material (Moya Utreras, 2016).

Figura 6.20

Dimensiones de lámina PVC.



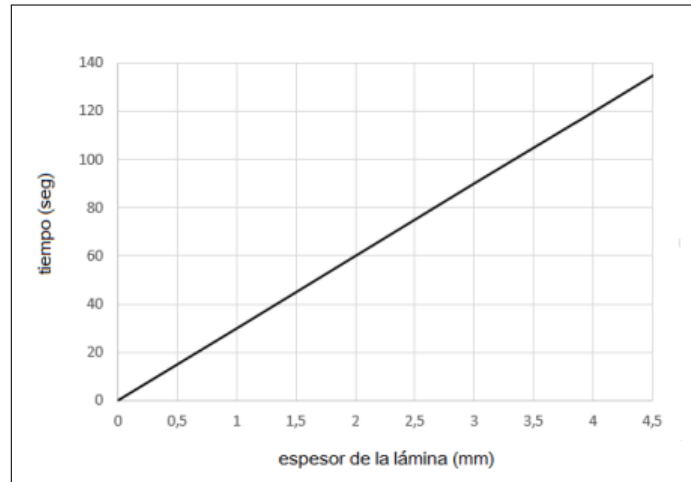
Nota: En la Figura se observa las medidas de la lámina utilizada para el dimensionamiento de las placas.

- **Tiempo de calentamiento en función del espesor del material**

El tiempo de calentamiento a temperatura de plastificación o de moldeo del material es fundamental para saber la distancia al que debe estar el mismo, de la fuente de calor para alcanzar la temperatura adecuada para ser termo formado. La Figura 6.21 indica que tiempo requiere el material de acuerdo a su espesor.

Figura 6.21

Tiempo de moldeo para lámina PVC.



Nota: Espesor vs tiempo de calentamiento del PVC (Brusil Arellano, 2016).

En la Figura 6.21 el tiempo aproximado de calentamiento para una lámina PVC de 0.5 mm de espesor es de 15 segundos. Este dato permitió encontrar la distancia con respecto al sistema de calentamiento, al que debe estar la lámina.

- **Calor necesario para calentar la lámina de PVC**

La Tabla 5.2 presenta la temperatura adecuada de 149 °C para el termoformado de una lámina de PVC de 0.5mm de espesor, comprendido en un rango de temperatura entre 17 °C (temperatura ambiente) y 149 °C (temperatura del proceso).

La cantidad de calor transferida a la lámina de PVC se define por la ecuación 1. En donde, se tiene como datos el calor específico (C_p) del PVC que equivale a $1172 \left[\frac{KJ}{Kg^{\circ}C} \right]$ y su densidad (ρ) de $1.400 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$, lo que se necesita es encontrar el valor de la masa del material.

El dato de volumen (V) del material se obtiene del producto de las dimensiones de la lámina PVC y su espesor, teniendo por consiguiente que su volumen es:

$$V = l \times a \times e \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$V = 23.222 \times 18.4 \times 0.05 = 21.3624 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Entonces al despejar el valor de masa de la ecuación 5.3 se tiene:

$$m = 0.02990736 \text{ [Kg]}$$

Finalmente se tiene de la ecuación 5.2 que la cantidad de calor a transferir a la lamina PVC es de:

$$Q = 0.02990736[Kg] \times 1172 \left[\frac{KJ}{Kg^{\circ}C} \right] \times (149 - 17)[^{\circ}C]$$

$$Q = 4.62678822 [KJ]$$

Se necesita transferir 4.62678822 [KJ] de calor a la lámina PVC para llegar a la temperatura deseada de formado. Sin embargo, se debe considerar que se requiere de un tiempo de 15 [s] para que el material alcance esta temperatura. La potencia requerida de un material en un tiempo determinado se expresa por la ecuación 5.4.

Sustituyendo el calor requerido en Julios y el tiempo en segundos, se obtiene una potencia requerida de:

$$P = \frac{4626.78822}{15} = 308.45 [W]$$

- **Tiempo y altura para termoformar el material PVC**

Para determinar la altura requerida para el termoformado de la lámina PVC, debemos calcular la masa de este volumen de aire, acudiendo a la ley del gas ideal, presente en la ecuación 5.7.

La ley del gas ideal nos indica la presión atmosférica (P) que para la ciudad de Cuenca es de 74.21 KP, la constante universal de los gases (R) equivalente a $8.314472 \left[\frac{m^3 Pa}{mol^{\circ}K} \right]$ y la temperatura ambiente (T) de la ciudad equivalente a 17 °C. Para determinar la cantidad de volumen de aire que esta siendo calentado realizamos lo siguiente:

$$V = 0.040022984[h] = 0.040022984h [m^3]$$

En donde los 0.040022984 corresponden al área del calentador y h a la altura del calentador con respecto a lámina PVC, en donde se encuentra el volumen de aire a calentar. Al despejar los números de moles de la ecuación 5.7 tenemos que:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

Sustituyendo datos tenemos como resultado que el numero de moles es de:

$$n = \frac{74210[Pa]0.040022984[h m^3]}{8.314472 \left[\frac{m^3 Pa}{mol^{\circ}K} \right] (17 + 273)[^{\circ}K]} = 1.23179[h mol].$$

La masa promedio del aire seco es de $28.97 \left[\frac{g}{mol}\right]$. Entonces por simple regla de 3 se tiene que la masa del aire es de:

$$m = 28.97\left[\frac{g}{mol}\right] \times 1.23179[h\ mol] = 35.6849h[g] = 0.035689[h\ Kg]$$

El volumen varía, mientras que la presión se mantiene constante. Por lo tanto, el calor específico a presión constante del aire es de:

$$C_p = 1007 \left[\frac{J}{Kg^\circ K} \right]$$

La potencia requerida para calentar el volumen presente entre el calentador y la lámina es de $52.67\ W$. Entonces para expresar este calor por unidad de tiempo usamos la ecuación 5.4, teniendo que:

$$Q = 20.5487 \times t \left[\frac{J}{s} \right]$$

Finalmente, empleamos la ecuación 5.2 para determinar la distancia y el tiempo al que debe estar la lámina PVC para obtener la temperatura deseada.

$$20.5487 \times t \left[\frac{J}{s} \right] = 0.035689h[Kg] \times 1007 \left[\frac{J}{Kg^\circ K} \right] \times (149 - 17)[^\circ K]$$

Los resultados de la altura en milímetros y el tiempo en segundos se muestra en la tabla.

Tabla 6.4

Altura y tiempo de calentamiento para lámina PVC de 0.5 mm de espesor.

Altura (mm)	Tiempo (s)
10	2.3
30	4.62
50	11.54
60	13.85
65	15
70	16.16

Nota: La Tabla indica la altura desde la fuente de calor hasta lámina PVC y el tiempo que esta tarda en calentarse a una temperatura constante de $200\ ^\circ C$.

La tabla 6.4 indica que a una altura de 65 milímetros, la lámina PVC alcanza su

temperatura de termoformado a los 15 segundos para un espesor de 0.5 milímetros.

- **Tiempo de enfriamiento del material PVC** El tiempo de enfriamiento del material se lo puede determinar mediante la siguiente ecuación, tomando en consideración la masa de aire que circula a una altura de 65 mm. Entonces la cantidad de calor necesaria para enfriar el PVC es de:

$$Q_{enfriamiento} = 0.002319[Kg] \times 1007 \left[\frac{J}{Kg^{\circ}K} \right] \times (149 - 17)[^{\circ}K] = 308.25[J]$$

Se determina una potencia de enfriamiento requerida de 308.25 [J], para determinar el tiempo requerido de enfriamiento relacionamos esta potencia con respecto a la potencia de pérdida de calor por convección que se pierde al calentar esa masa de aire que equivale a 20.54 [W]. Entonces se tiene un tiempo de enfriamiento de:

$$t = \frac{308.25[J]}{20.54[W]} = 15seg$$

- **Tiempo de calentamiento del PVC de acuerdo a su espesor**

Para determinar el tiempo de calentamiento de la lámina PVC de acuerdo a su espesor, hacemos uso de las ecuaciones 5.5 y 5.6.

En primer lugar, se debe determinar la masa del material PVC de acuerdo a su espesor, en el caso de la lámina PVC de 0.5 mm de espesor tenemos un valor de masa equivalente a 0.02990736 [kg].

Por otra parte para determinar el factor de visión se hace uso del área tanto del sistema de calentamiento como de la lámina PVC involucrada en el proceso de termoformado.

En base a lo anteriormente dicho, se obtuvo los siguientes datos, reflejados en la Tabla 6.6 :

Tabla 6.5*Datos del sistema de calentamiento y lámina PVC*

Datos del sistema de calentamiento y lámina PVC			
$X_c[cm] =$	12.2	$X_l[cm] =$	23.22
$Y_c[cm] =$	12.2	$Y_l[cm] =$	18.4
$\varepsilon_1 =$	0.9	$\varepsilon_2 =$	0.76
$A_1[m^2]$	0.0400220	$A_2[m^2]$	0.0427248
$T[K^\circ]$	473	$T_i[K^\circ]$	290

Nota: La Tabla presenta los datos del sistema de calentamiento y lámina PVC que se utilizarán para determinar el tiempo de calentamiento del proceso de termoformado.

Se escogió la distancia de 65 mm entre la fuente de calor y la lámina a conformar, por ser esta la medida que mejor se aproxima al tiempo de termformado de lámina PVC de 0.5mm de espesor de acuerdo a la Tabla 6.4. Por otra parte, los datos de X_l y Y_l que corresponden a las medidas de la lámina PVC, se divide para la distancia existente entre la fuente de calor y lámina. Posteriormente, con el dato resultante en centímetros se ubica el valor del factor de visión F_{1-2} con ayuda de la Figura 5.3. Finalmente, sustituimos los datos correspondientes en la ecuación 5.6 :

$$F_{1-2} = \frac{1}{\left(\frac{1-0.9}{0.9 \times 0.0400220}\right) + \left(\frac{1-0.76}{0.76 \times 0.0427248}\right) + \left(\frac{1}{0.0400220 \times \frac{0.6+1}{2}}\right)} = 0.241[m^2]$$

Una vez obtenido el factor de visión F_{1-2} , se sustituye en la ecuación 5.5, para de este modo obtener nuestra temperatura de la lámina después de un incremento de tiempo establecido en este caso $\Delta t = 1s$.

$$\frac{0.02991[kg] \times 1172 \left[\frac{KJ}{Kg^\circ C}\right] \times (T_{i+1} - 290K^\circ)}{1s} =$$

$$0.241[m^2] \times 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^\circ}\right] \times (473^4 - 290^4)K^\circ$$

El valor de la primera interacción es de $T_{i+1} = 306.75K^\circ$. Para la siguiente iteración, el valor de temperatura inicial será igual al que se calculó en la anterior iteración. De esta forma, se realizan tantas iteraciones hasta llegar al valor de temperatura de formado del material correspondiente. En las siguientes tablas se muestran los resultados de las iteraciones hasta alcanzar las temperaturas de formado de cada

material (Calle Cabrera y cols., 2017).

Tabla 6.6

Datos del sistema de calentamiento y lámina PVC (0.5mm).

Datos del sistema de calentamiento y lámina PVC		
$t[s] =$	$T_i[K^\circ]$	$T_{i+1}[K^\circ]$
0	-	290
1	290	306.75
2	306.75	322.81
3	322.81	338.08
4	338.08	352.49
5	352.49	365.98
6	365.98	378.49
7	378.49	390
8	390	400.49
9	400.49	409.97
10	409.97	418.46
11	418.46	426.01

Nota: La Tabla presenta los datos del sistema de calentamiento y lámina PVC que se utilizarán para determinar el tiempo de calentamiento del proceso de termoformado.

Tabla 6.7

Datos del sistema de calentamiento y lámina PVC (1mm).

Datos del sistema de calentamiento y lámina PVC		
$t[s] =$	$T_i[K^\circ]$	$T_{i+1}[K^\circ]$
0	-	290
1	290	298.35
2	298.35	306.53
3	306.53	314.54
4	314.54	322.36

Continuación Tabla 6.7

Datos del sistema de calentamiento y lámina PVC		
$t[s] =$	$T_i[K^\circ]$	$T_{i+1}[K^\circ]$
4	314.54	322.36
5	322.36	329.98
6	329.98	337.40
7	337.40	344.60
8	344.60	351.58
9	351.58	358.34
10	358.34	364.86
11	364.86	371.14
12	371.14	377.17
13	377.17	382.96
14	382.96	388.50
15	388.50	393.80
16	393.80	398.85
17	398.85	403.65
18	403.65	408.22
19	408.22	412.55
20	412.55	416.64
21	416.64	420.51

Nota: La Tabla presenta los datos del sistema de calentamiento y lámina PVC que se utilizarán para determinar el tiempo de calentamiento del proceso de termoformado.

6.4.2. Análisis del sistema de Vacío en el diseño

6.4.2.1. Potencia y tiempo de vacío

En el proceso de vacío sucede lo que se denomina succión y se usa como elemento principal el motor de una aspiradora, según Brusil Arellano (2016) menciona que algunos autores recomiendan 3 HP de potencia, ya que de este modo la apariencia de la pieza tendrá mejor

resultado de tal modo que el proceso de vaciado de aire se logra de una manera más eficaz y rápida mediante pruebas de satisfacción, este proceso toma entre 10 y 15 segundos.

6.4.2.2. Características de la cámara de vacío

La cámara de vacío es un espacio hermético que sirve para succionar el aire mediante orificios entre la lámina de termoplástico y el molde, la cual está conectada a la manguera que lleva a la aspiradora. Esta posee orificios que son de 0.021 in y 0.0135 in (0.53 mm-0.34 mm) cuando se emplean láminas delgadas y diámetros de 0.035 in y 0.020 in (0.89 mm-0.51 mm) para láminas de mayor espesor (Plastics Engineering Handbook, como se citó en (Bejarano, 2003)). La cantidad de agujeros determinan la velocidad de formado, procurando que este proceso sea rápido de tal modo que la calidad no se vea afectada. La cantidad de orificios va a estar dados por una distancia y “espaciado de 0.25in (6.35 mm)”, (Plastics Engineering Handbook, como se citó en (Bejarano, 2003)).

La cámara de vacío tiene dimensiones de 254 x 250 x 48 mm en aluminio PRODAX, Los agujeros tienen un diámetro de 0.53 mm y estarán separados por una distancia de 6 mm, estas medidas fueron impuestas con el objetivo de que no quede marca en la lámina. Según Plastiglas de México (2012) cuanto más rápido sea el vacío, mejor se verá la pieza, y las piezas muy profundas o las secciones complejas a veces requieren una velocidad de conformado más lenta.

6.4.3. Análisis del sistema estructural en el diseño

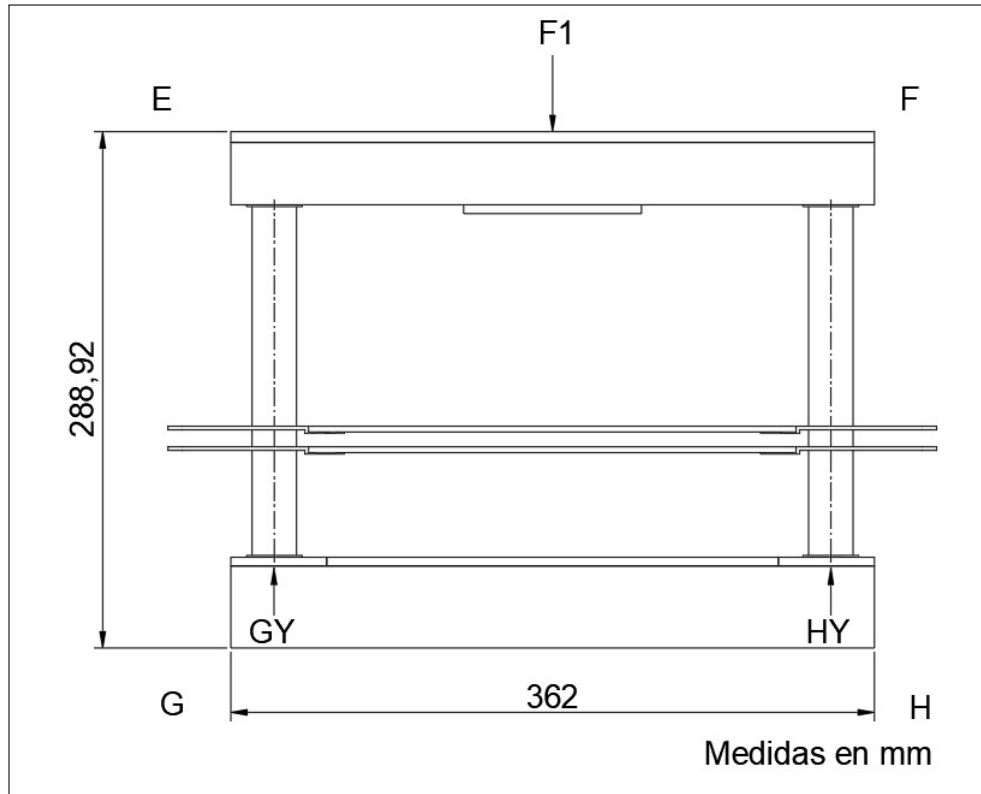
La estructura es la encargada de soportar su peso propio y demás componentes, así como cargas resultantes y sus apoyos, con el objetivo de prever posibles fallos durante su funcionamiento, garantizando la seguridad del operario y el correcto funcionamiento de todos los componentes mecánicos que son accionados por los diferentes actuadores que están acoplados a la estructura.

En el cálculo estructural se tomó en cuenta el análisis estático, las reacciones y como se relacionan con los apoyos y la determinación de las fuerzas internas y de los esfuerzos estructurales en elementos críticos que están analizados posteriormente.

La termo formadora fue diseñada con placas comerciales de duro aluminio (PRODAX) de 274 mm de alto con un ancho y largo de 362 mm, donde se acoplan dos perfiles redondos de acero inoxidable igualmente de medidas comerciales que permiten el deslizamiento de las placas porta láminas láminas de plástico. En la base superior se acopla el sistema de atemperado con sus aislamientos respectivos y en la parte inferior el sistema de vacío. En la siguiente Figura 6.22 se presenta el esquema con sus cargas.

Figura 6.22

Diagrama de fuerzas.



Nota: En la Figura se ilustra el esquema del diagrama de fuerzas que influye en la estructura.

▪ **Análisis estático**

$$L = 362mm$$

$$F_1 = 25.516N$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-F_1 + G_y + H_y = 0 \tag{6.2}$$

$$\sum M_H = 0$$

$$\frac{F_1 \times L}{2} - G_y \times L \tag{6.3}$$

$$G_y = \frac{4618.396}{362} = 12.758N$$

$$Hy = F_1 - Gy \quad (6.4)$$

$$Hy = 25.516 - 12.758$$

Mayor reacción del sistema estructural:

$$Hy = 12.758N$$

- **Cálculo de la inercia de la sección transversal**

$$I = \frac{\pi}{64(D^4 - d^4)} \quad (6.5)$$

$$I = \frac{\pi}{64(0.0254^4 - 0.0239^4)}$$

$$I = 4,4154 \times 10^{-9} m^4$$

- **Cálculo del área transversal**

$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (6.6)$$

$$A = \frac{\pi(0.0254^2 - 0.0239^2)}{4}$$

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

- **Radio de giro**

$$r = \frac{\sqrt{D^2 + d^2}}{4} \quad (6.7)$$

$$r = \frac{\sqrt{0.0254^2 + 0.0239^2}}{4}$$

$$r = 0.00871m$$

- **Longitud efectiva**

$$K = 0.65$$

$$L = 274mm$$

$$Le = K \times L \tag{6.8}$$

$$Le = 0.1781m$$

- **Relación de esbeltez**

$$SR = \frac{Le}{r} \tag{6.9}$$

$$SR = \frac{0.1781}{0.00871}$$

$$SR = 20.44$$

- **Relación de esbeltez de transición**

El valor del límite de fluencia se tomó de la Tabla 6.8 considerando como material el acero inoxidable 304.

Tabla 6.8*Propiedades mecánicas de los aceros inoxidable.*

Propiedades mecánicas de los aceros inoxidable			
Material	Límite de fluencia σ_t [MPa]	Resistencia máxima σ_u [MPa]	Dureza [HV]
AISI 304	234.7	573.6	190
AISI 420	906.9	1410.8	464
AISI 329	506.7	647.9	254

Nota: En la Tabla se indica los parámetros mecánicos de los aceros inoxidable donde se encuentra el límite de fluencia para el acero 304 (Suárez, Suárez, y Contreras, 2001).

$$E = 200GPa$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (6.10)$$

$$C_c = 129.69$$

$$SR < C_c$$

Por lo tanto, se considera una columna corta y se aplica la fórmula de J. B. Johnson.

$$P_{cr} = A \times S_y \left(1 - \frac{S_y \times SR^2}{4 \times \pi^2 \times E}\right) \quad (6.11)$$

$$P_{cr} = 1189N$$

- **Carga admisible con un factor de seguridad N=3**

$$P_a = \frac{11589}{3}$$

$$P_a = 3863N$$

- **Carga admisible por cada par de columnas**

$$P_{a2} = P_a \times 2 \quad (6.12)$$

$$P_{a2} = 7726N$$

$$7726N > 12.758N$$

Por lo tanto, la carga admisible es mayor a la que se encuentra sometida el sistema.

6.4.4. Análisis del sistema electrónico en el diseño

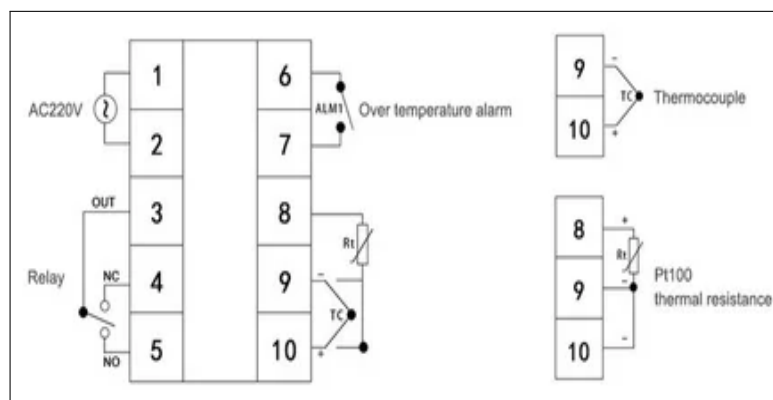
6.4.4.1. Esquema de control de temperatura de lámpara IR

En el campo de la automatización industrial, a menudo encontramos muchos tipos de controladores electrónicos. Entre los tipos de controladores de temperatura, los controladores PID son el tipo de controlador más rápido y preciso. El controlador REX-C100 de la Figura 6.11 es un controlador de temperatura PID estándar de tipo montaje en panel que está disponible en múltiples combinaciones diferentes (xiao shenlin, 2022).

Los controladores de temperatura REX-C100 son fáciles de instalar y siguen las huellas de hardware industrial, como los tamaños de montaje estándar y la nomenclatura de cableado. En la Figura 6.23 se puede observar el esquema de conexión del control con sus respectivos pines de entrada y salida (xiao shenlin, 2022) .

Figura 6.23

Esquema de conexión del controlador REX-C100.



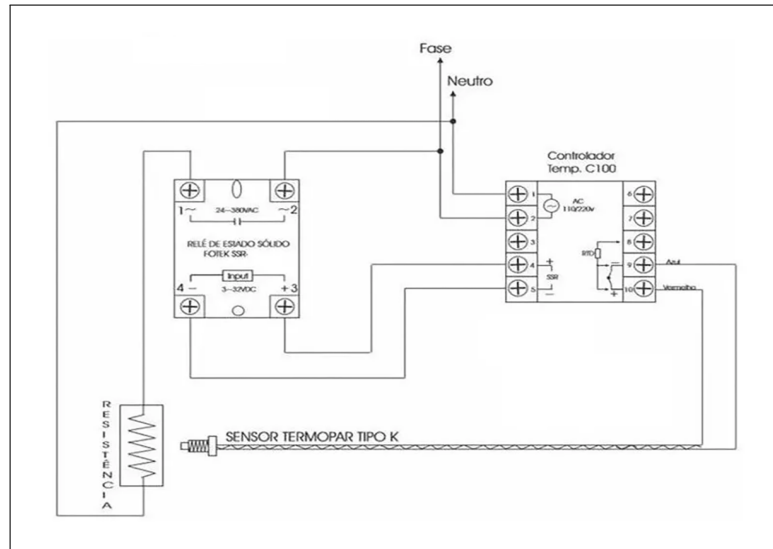
Nota: Controlador REX-C100 con sus respectivos pines de conexión (xiao shenlin, 2022).

De acuerdo a la Figura 6.23 el suministro de energía alterna de 220 V se hace mediante

los pines 1 y 2. Los pines 4 y 5 suministran energía continua hacia el SSR (Relé de estado sólido). Finalmente en los pines 8,9 y 10 son pines para realizar la conexión de la termocupla tipo K. En la Figura 6.24, se indica la conexión de los distintos elementos que conforman el sistema de calor con el control de temperatura.

Figura 6.24

Esquema electrónico de control de temperatura.



Nota: Esquema electrónico para controlar la temperatura del equipo (Circuitarte, 2022).

6.4.4.2. Modelado matemático

Se restableció la diferencia de calor que tiene el sistema como:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (6.13)$$

Donde:

Q_{in} Calor de entrada
 Q_{out} Calor de salida

Se definió el calor de entrada como:

$$Q_{in} = \alpha \times Q_i \quad (6.14)$$

Donde Q_i es el porcentaje de salida del calentador (0 a 100) y es un factor que relaciona la salida del calentador (0% a 100%) con la potencia disipada por la resistencia en vatios. El calor de salida se definió mediante la ley de enfriamiento de Newton para convección y la ley de enfriamiento de Stefan-Boltzmann para radiación:

$$Q_{out} = K_T(T - T_\infty) + \varepsilon\sigma A(T^4 - T_\infty^4) \quad (6.15)$$

Donde K_T es la constante de perdida para el ambiente, T es la temperatura de la resistencia, T_∞ es la temperatura del ambiente, ε es la emisividad, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y A es el área de la resistencia. Reemplazando (6.25) y (6.14) en (6.13)

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \alpha Q_i - K_T(T - T_\infty) - \varepsilon\sigma A(T^4 - T_\infty^4) \quad (6.16)$$

Sé definió la constante de perdida para el ambiente como:

$$K_T = UA \quad (6.17)$$

Donde U es el coeficiente de transferencia de calor.

Reemplazando (6.17) en (6.16)

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \alpha Q_i + UA(T_\infty - T) + \varepsilon\sigma A(T_\infty^4 - T^4) \quad (6.18)$$

Utilizando el concepto de derivada:

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha Q_i + UA(T_\infty - T) + \varepsilon\sigma A(T_\infty^4 - T^4) \quad (6.19)$$

Con la ayuda del calor especifico C_p , la masa (m) de la resistencia, y el cambio de temperatura $T - T_{ref}$, se puede calcular el calor liberado o absorbido.

$$Q = mC_p(T - T_{ref}) \quad (6.20)$$

Reemplazando (6.20) en (6.21) se obtiene el modelo del sistema.

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \alpha Q_i + UA(T_\infty - T) + \varepsilon\sigma A(T_\infty^4 - T^4) \quad (6.21)$$

El calor de entrada puede reemplazarse por la potencia disipada por una resistencia de calentamiento de la siguiente forma:

$$P = \frac{V^2}{R} = \alpha Q_i \quad (6.22)$$

Donde es el voltaje suministrado y es la resistencia de una niquelina. Entonces el modelo del sistema es:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \frac{V^2}{R} + UA(T_\infty - T) + \varepsilon\sigma A(T_\infty^4 - T^4) \quad (6.23)$$

La resistencia de una niquelina se expresa de la siguiente forma:

$$R = R_0(1 + \lambda\Delta T) \quad (6.24)$$

Donde R_0 es la resistencia de la niquelina a 23 °C, λ el coeficiente de variación de la resistencia en función de la temperatura (0.0002 para la niquelina), y ΔT es la variación de la temperatura con respecto a 23 °C. El sistema es de una potencia (P) de 625 W y alimentado con un voltaje nominal V igual a 110 V, entonces la resistencia del calentador es la siguiente:

$$R_0 = \frac{V^2}{P} = 19.36\Omega \quad (6.25)$$

Se selecciona una Resistencia de $30 \frac{\Omega}{m}$ por lo cual la longitud de la resistencia a utilizar es de 0.6453 m con una superficie de 212.96 cm^2 y una masa de alrededor de 0.2 Kg. La Tabla 6.9 define las constantes del sistema:

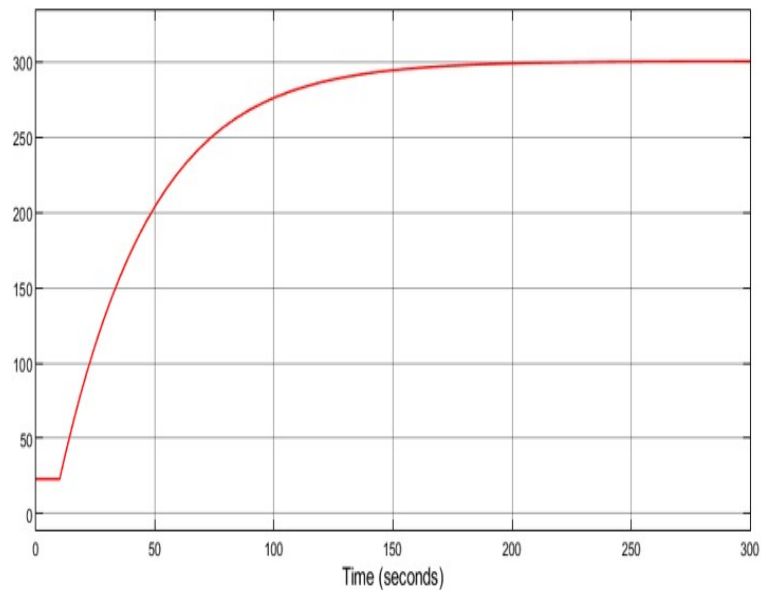
Tabla 6.9*Constantes del sistema*

Parámetro	Valor
Temperatura inicial T_0	23 [°C]=296.15 [°K]
Temperatura ambiente T_∞	23 [°C] =296.15 [°K]
Potencia del calentador	0 a 625 [W]
Voltaje (V)	0 a 110 [Vrms]
Resistencia inicial R_0	19.36 Ω
Masa (m)	0.2 [kg]
Capacidad calorífica C_p	440 [$\frac{J}{Kg[K^\circ]}$]
Área de la superficie (A)	0.021296 [m ²]
Coefficiente de transferencia de calor (U)	20 a 100 [$\frac{W}{m^2K^\circ}$]
Emisividad (ϵ)	0.5
Constante de Boltzmann (σ)	5.67×10^{-8} [$\frac{W}{m^2K^{\circ 4}}$]
Densidad	8908 [$\frac{Kg}{m^3}$] a 20[°C]
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras
Estado en condiciones normales	Sólido (ferromagnético)
Punto de fusión	1728[°K]
Punto de punto de ebullición	3003[°K]
Calor de fusión	17,47 [$\frac{KJ}{mol}$]
Calor de vaporización	371,8 [$\frac{KJ}{mol}$]
Presión de vapor	237[Pa], para una temperatura de 1726 [°K]
Electronegatividad	1.91
Calor específico	440 [$\frac{J}{KKg}$]
Conductividad térmica	90.7 [$\frac{W}{Km}$]
Coefficiente de dilatación térmica	$\frac{13 \times 10^{-6}}{\ddot{r}C}$
Esfuerzo último de tensión	470 [Gpa]

Nota: la Tabla presenta las constantes del sistema.

Figura 6.25

Señal de salida del sistema modelado.



Nota: En la Figura se observa la respuesta del modelo dinámico ante un cambio de entrada tipo escalón de 110 Vrms.

6.4.4.3. Modelado empírico por el método de Alfaro

El método de Alfaro sirve para estimar parámetros a través de la respuesta del sistema mediante dos puntos. El primer punto se estima cuando el sistema llega al 25% y el segundo punto al 75% del tiempo de respuesta.

Este método según Alfaro (2001) está representado por las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U} \quad (6.26)$$

$$\tau = 0.9102(t_{75\%} - t_{25\%}) \quad (6.27)$$

$$t_0 = 1.262t_{25\%} - 0.262t_{75\%} \quad (6.28)$$

Aplicando el método empírico, el desarrollo queda de la siguiente manera:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U}$$

$$K = \frac{227}{110}$$

$$K = 2.5182$$

$$\tau = 0.9102(t_{75\%} - t_{25\%})$$

$$\tau = 0.9102(52.041 - 11.11)$$

$$\tau = 37.255$$

$$t_0 = 1.262t_{25\%} - 0.262t_{75\%}$$

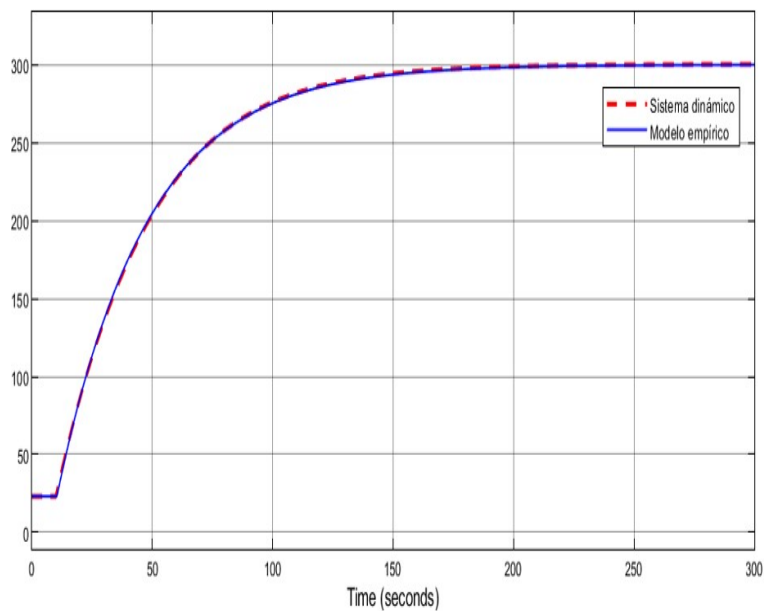
$$t_0 = 0.386$$

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0 s}}{\tau s + 1}$$

$$G(s) = \frac{2.5182e^{-0.386s}}{37.255s + 1}$$

Figura 6.26

Validación del modelo empírico



Nota: En la Figura se observa la ecuación del modelo empírico con la ecuación de salida del modelo.

6.4.4.4. Controlador PI sintonizado mediante Dahlin

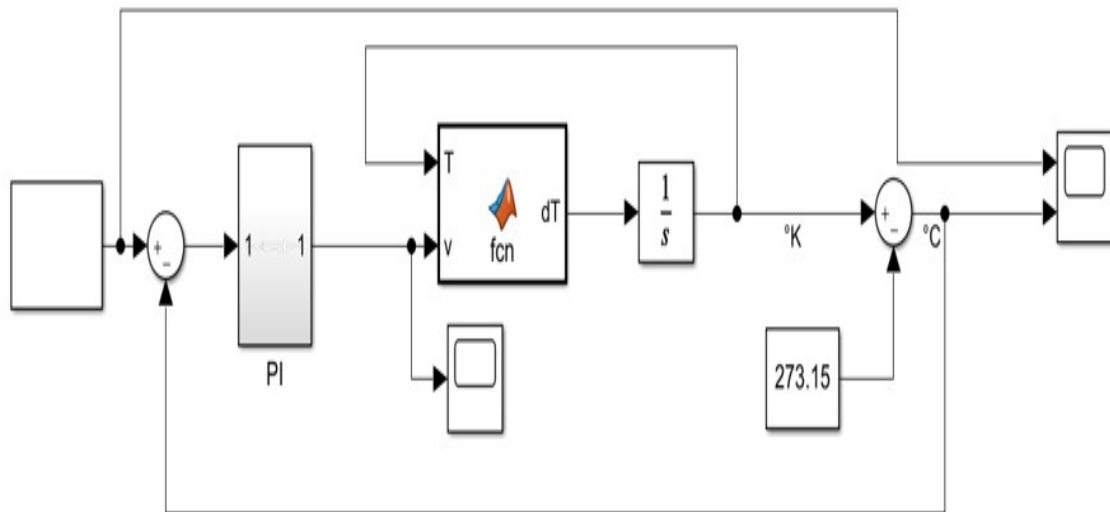
$$K_c = \frac{1}{2K} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)$$

$$K_c = \frac{1}{2 \times 2.5182} \left(\frac{37.255}{0.836} \right) = 19.164$$

$$\tau_i = \tau = 37.255$$

Figura 6.27

Control PI en Simulink.

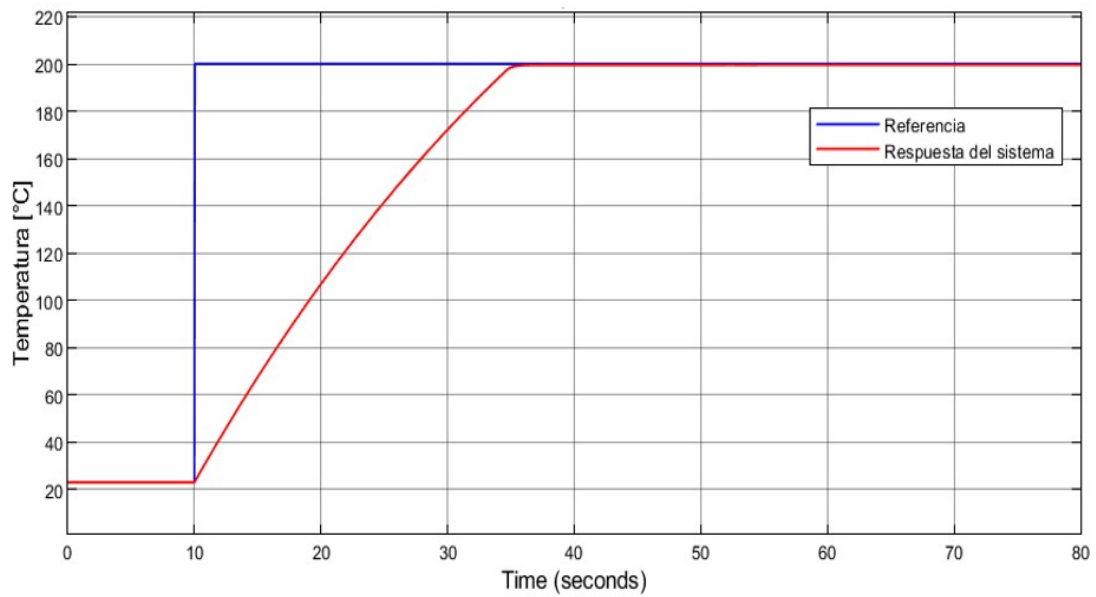


Nota: En la Figura se observa el control PI implementado en la planta.

Se reajustó la constante integral del controlador por un valor de 500 y se tiene el siguiente resultado

Figura 6.28

Señal de salida del control PI

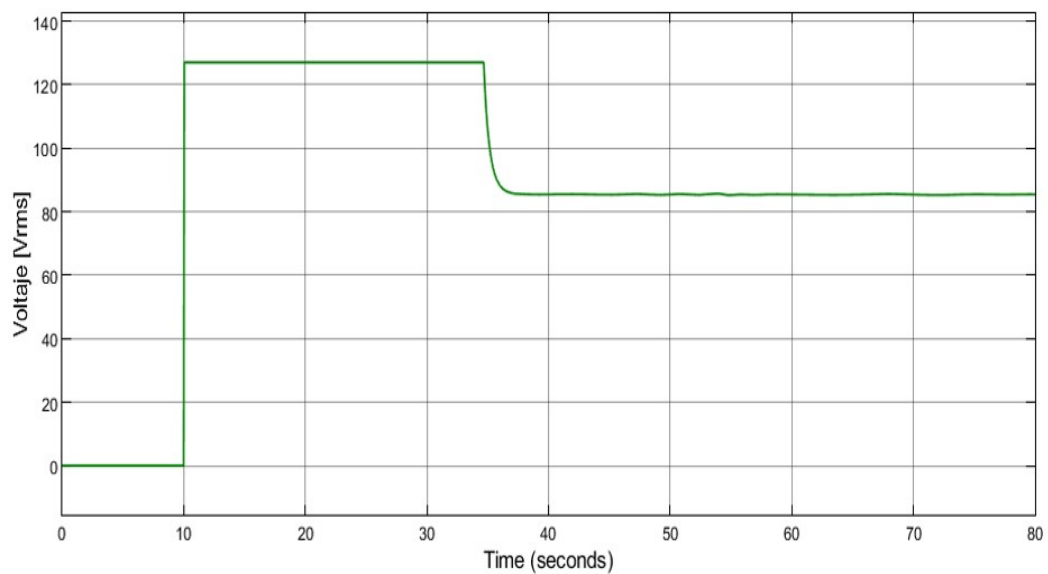


Nota: En la Figura se observa la señal de salida del control con la señal de referencia.

La acción de control del sistema es:

Figura 6.29

Señal de salida con control del sistema.



Nota: En la Figura se observa la acción de control cuando el sistema esta alimentado.

6.4.5. Análisis del sistema motriz en el diseño

El desplazamiento del marco porta lámina entre la fuente de calor y la cámara de vacío será automático y con una velocidad rápida. El actuador lineal debe soportar una carga de 1,06 kg como mínimo que es el peso del marco porta láminas y el recorrido máximo será de 128 mm. Como respuesta a estas condiciones se optó por usar un tornillo de bolas con una guía lineal de 250 mm con un motor de marca “nema 23”, el cual tiene un torque y velocidad idónea para la máquina termoformadora. Según las especificaciones del actuador lineal, la capacidad de carga máxima vertical es de 10 kg y alcanza una velocidad de 50 mm por segundo (Sainsmart, 2018).

Figura 6.30

Actuador lineal conectado al motor Nema 23.



Nota: Actuador lineal en conjunto con el motor seleccionado (Sainsmart, 2018).

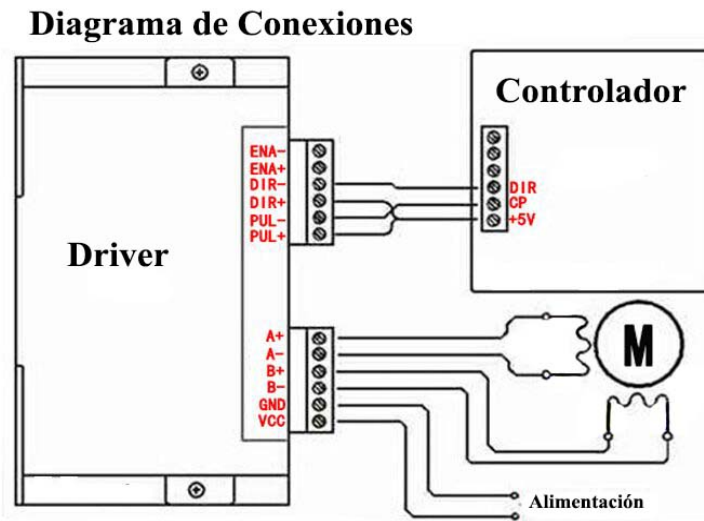
6.4.5.1. Esquema de control de Motor Nema 23

Los motores paso a paso son un conjunto consistente de una caja reductora y un motor DC con una distribución especial en sus bobinas. Esta distribución especial permite moverlos secuencialmente a medida que activamos y desactivamos cada bobina de una forma específica. Cabe destacar también que, a diferencia de los servomotores, un motor paso a paso no tiene un sistema de retroalimentación para su posición, de esta forma, si por ejemplo una fuerza externa lo mueve del de su set point, este no será capaz de volver a tal posición (Arrieta, 2018).

Finalmente, para mover un motor paso a paso, como ya se dijo, es necesario activar sus bobinas en una secuencia específica, por lo tanto, se hace necesario programar en un microcontrolador la secuencia de pasos requerida. Sin embargo, existe una forma de simplificar esto, por medio del TB6600 (Arrieta, 2018). En la Figura 6.31 se indica la conexión del motor, el driver y el microcontrolador para el control del motor.

Figura 6.31

Esquema de control de motor Nema 23.



Nota: La Figura presenta el esquema electrónico para controlar el motor Nema 23 (Electronilab, 2022).

6.5. Evaluación del diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas

6.5.1. Configuración del software de simulación

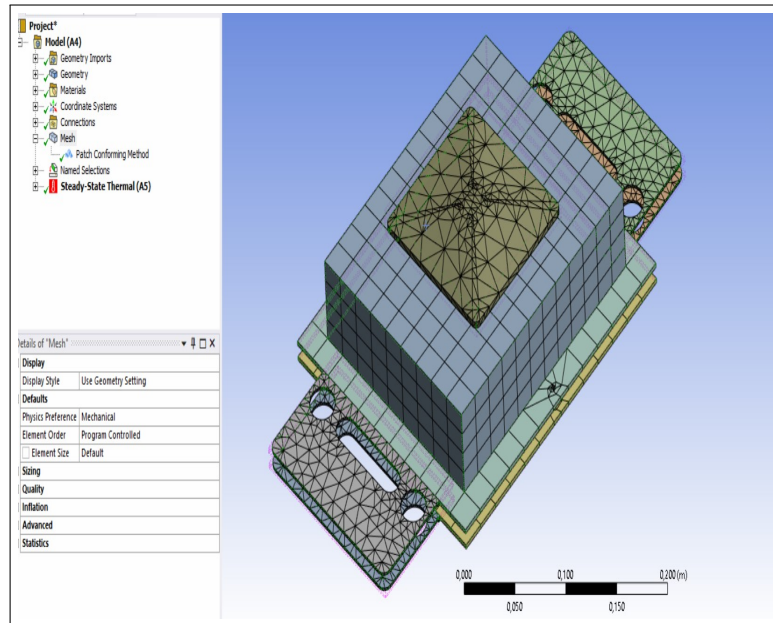
Las aplicaciones de Ansys en la industria son amplias y variadas, y son muy usadas en la simulación de componentes mecánicos o máquinas completas. En ese sentido, hay máquinas que, debido a la naturaleza de sus geometrías, o de las funciones que desempeñan, hacen que sean especialmente desafiantes el poder simularlas correctamente. Este es el caso de las máquinas industriales, especialmente las termoformadoras (Prototicad3D, 2023).

6.5.1.1. Mallado del sistema

De manera general y descriptiva, una discusión sobre algunas de las variables de mallado se abarcan en esta sección que sirven para realizar las simulaciones numéricas, además que son indicadores al momento de emplear el software. En cuanto a control de parámetros para la creación, se optó por una malla conformada por hexaedros y tetraedros con el objetivo de que sea regular con secciones pequeñas, de tal modo que los cálculos sean más precisos.

Figura 6.32

Mallado del equipo de termoformado para la simulación.



Nota: En la Figura se observa el mallado de forma tetraedrico y hexaedrico para obtener un mejor resultado.

6.5.1.2. Parámetros para la simulación

El análisis fue realizado en el software Ansys con el objetivo de analizar la transferencia de calor entre la lámpara de calor y la lámina de PVC, considerando las siguientes variables:

- Materiales

Figura 6.33

Propiedades del aire.












Properties of Outline Row 3: Air				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Isotropic Thermal Conductivity	0,02	W m ⁻¹ C ⁻¹	
4	Specific Heat Constant Pressure, C _p	1007	J kg ⁻¹ C ⁻¹	
5	Isotropic Relative Permeability	1		
6	Specific Heat Constant Volume, C _v	172	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

Nota: En la Figura se observa las propiedades del aire utilizadas para la simulación.

En las Figuras 6.33, 6.34 y 6.35 se observan las propiedades de los materiales seleccionados para la construcción de la máquina termoformadora y en la simulación con el software, entre ellos están el aire, la lámpara y las láminas de PVC.

Figura 6.34




















Propiedades físicas de la lámpara.

Properties of Outline Row 4: Lámpara				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	Table		
3	 Isotropic Thermal Conductivity	32	W m ⁻¹ C ⁻¹	  
4	 Specific Heat Constant Pressure, C _p	800	J kg ⁻¹ C ⁻¹	  

Nota: En la Figura se observa las propiedades de la lámpara utilizada para la simulación.

Figura 6.35

Propiedades físicas del PVC.

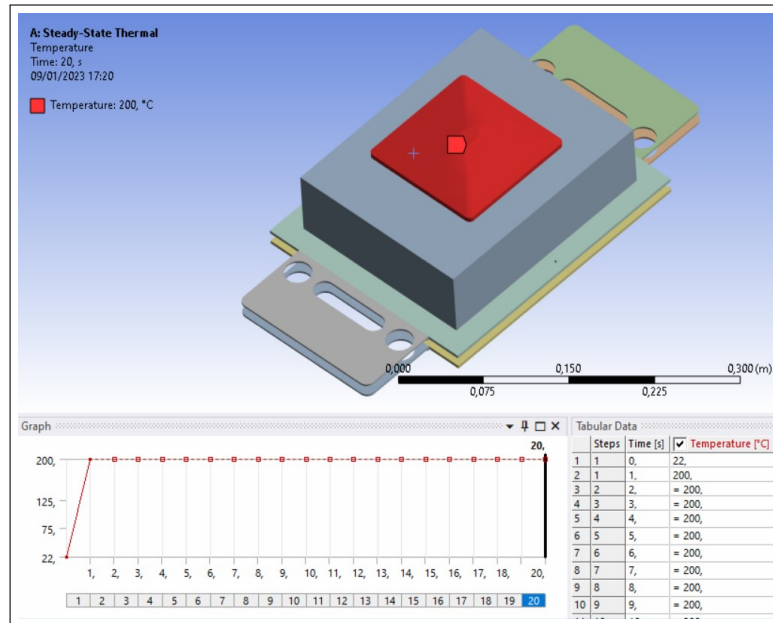
Properties of Outline Row 5: PVC				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	Table		
3	 Density	1,4	g cm ⁻³	  
4	 Isotropic Thermal Conductivity	0,17	W m ⁻¹ C ⁻¹	  
5	 Specific Heat Constant Pressure, C _p	1172	J kg ⁻¹ C ⁻¹	  
6	 Specific Heat Constant Volume, C _v	1460	J kg ⁻¹ C ⁻¹	  

Nota: En la Figura se indica las propiedades de la lámina PVC utilizadas para la simulación.

- **Temperatura de la fuente de calor**

Figura 6.36

Temperatura de la fuente de calor.

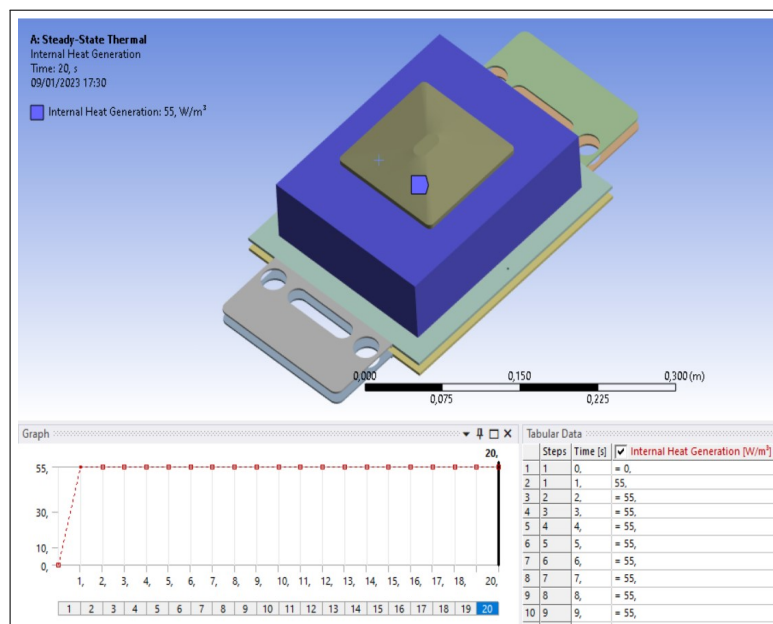


Nota: En la Figura se observa la temperatura utilizada en la fuente de calor para la simulación.

■ **Calor interno generado**

Figura 6.37

Calor generado entre la fuente de calor y el aire.



Nota: En la Figura se observa que el aire se encuentra en el recuadro azul, medio por el cual el calor será transferido.

Este parámetro fue calculado con la fórmula de la energía emitida por la fuente de calor que se expresa por la siguiente ecuación:

$$H = \epsilon \sigma A T^4$$

Donde:

ϵ coeficiente de emisividad con un rango entre 0 y 1.

σ Constante de Boltzmann 5.67×10^{-8}

A Área

T variación de la temperatura

$$\frac{H}{A} = 0.94 \times (5.67 \times 10^{-8} A)(150^4 - 17^4) \text{ } ^\circ C$$

$$\frac{H}{A} = 55 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

- **Convección.** El coeficiente de convección fue calculado mediante la siguiente formula:

$$h_c = \frac{\frac{H}{A}}{\Delta T}$$

Donde:

h_c Coeficiente de convección del aire

H energía emitida por la fuente de calor

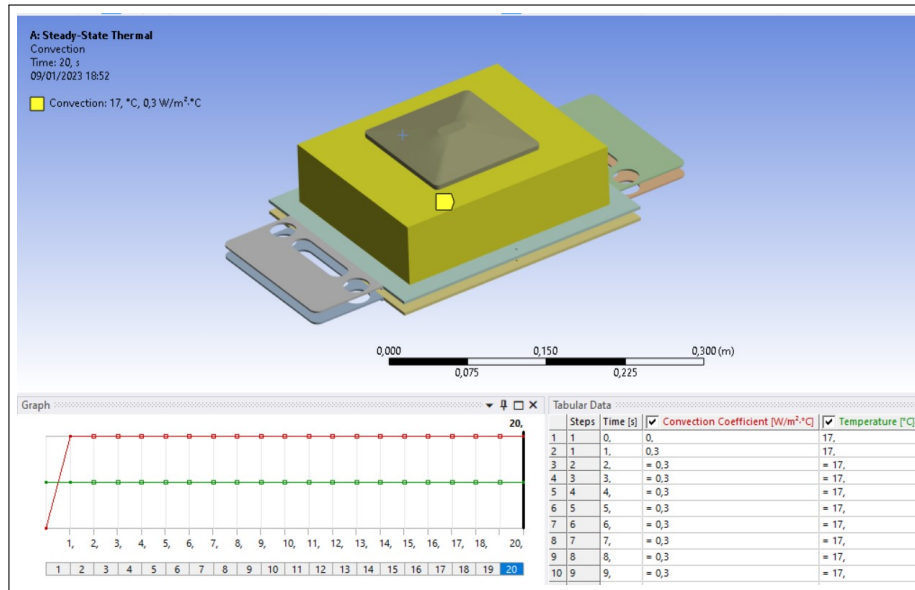
ΔT variación de temperatura

Entonces el coeficiente de convección del aire es:

$$h_c = \frac{55}{(200 - 17)C^\circ} = 0.30 \left[\frac{W}{m^2 \times ^\circ C} \right]$$

Figura 6.38

Coefficiente de convección en la cantidad de aire circulante.

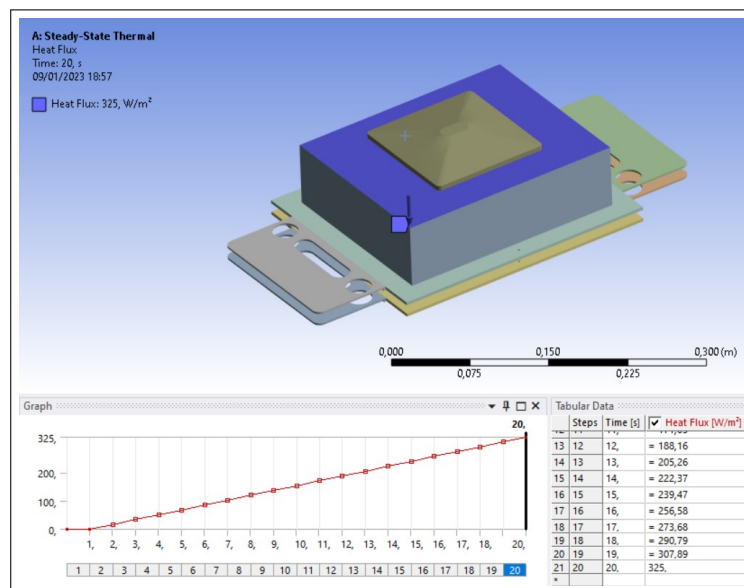


Nota: En la Figura se observa que el aire se encuentra en el recuadro amarillo y el coeficiente de convección determinado corresponde a esta cantidad de aire.

- Potencia emitida por la lámpara

Figura 6.39

Potencia de la lámpara de calor.



Nota: En la Figura se observa la potencia generada por la fuente de calor como parámetro para la simulación.

6.6. Resultados

6.6.1. Parámetros iniciales para el diseño mecánico y electrónico de la máquina termoformadora

A continuación se presentan los parámetros iniciales establecidos para el diseño de la máquina termoformadora:

6.6.1.1. Parámetros mecánicos

Los parámetros seleccionados se presentan en la Tabla 6.10 donde el aluminio prodax presenta la mejor alternativa en la selección del material para el diseño y la construcción de algunos elementos de la máquina termoformadora, como las bases y la tapa del sistema de vacío, debido a que las mismas deben presentar un peso ligero, además de resistir altas temperaturas. Para el diseño de la mesa donde se ubica la máquina se consideró un acero estructural inoxidable 304 donde se asienta un tablero de granito.

Tabla 6.10

Parámetros mecánicos del equipo de termoformado.

<u>MAQUINA</u>					
<u>Elemento</u>	<u>Material</u>	<u>Largo</u> <u>[mm]</u>	<u>Ancho</u> <u>[mm]</u>	<u>Alto</u> <u>[mm]</u>	<u>Costo</u> <u>[\$]</u>
Base Superior	Aluminio Prodax	250	362	35	\$ 30
Fuente de calor	Cerámica Alúmina	122	122	25	\$ 16
Columnas	Acero Inox.304	274	∅ 25.4	e = 1.5	\$ 36.75
Marco portalámina	Acero Inox.304	274.22	226	3	\$18.65
Lámina PVC	PVC	184	232.22	0.5	\$ 6.50
Base inferior	Aluminio Prodax	250	362	46	\$ 60
Plancha taladrada	Aluminio Prodax	250	254	2	\$ 10
<u>MESA</u>					
Tablero	Granito	1060	760	24.5	\$ 100
Estructura	Ac. Inox. 304	6	6	900	\$ 140
Costo Total:					\$ 417.9

Nota: La Tabla presenta los parámetros iniciales establecidos para el diseño de la máquina termoformadora de acuerdo a los parámetros mecánicos y ergonómicos.

6.6.1.2. Parámetros ergonómicos

Los parámetros ergonómicos se establecieron en el alto de la mesa 900 mm como se indica en la Tabla 6.10, y está definido de acuerdo a los criterios establecidos para trabajos de pie.

6.6.1.3. Parámetros electrónicos

Respecto a los datos analizados como parámetros iniciales electrónicos, se seleccionó los elementos más adecuados para el control de temperatura y velocidad de posición del marco portalámina. Los parámetros principales considerados para el diseño electrónico se pueden observar en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11

Parámetros electrónicos del equipo de termoformado.

ELEMENTOS ELECTRÓNICOS					
Elemento	Descripción	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Potencia [W]	Costo [\$]
Sensores	Termocupla tipo K	5V	0.05	0.25	\$ 8.50
	Fuente de alimentación	12	5	60	\$ 13.08
Actuadores	Lampara IR	120	0.18	650	\$ 16
	Motor Nema 23	24	1.5	–	\$ 80
	Actuador lineal	–	–	–	\$ 328
	Aspiradora	110	10	1000	\$ 50
Controles	Controlador PID REX C100	110	3	–	\$ 40
	Microcontrolador esp32	3.3	0.08	–	\$ 28
	TB 6600	122	12	0.015	\$ 28
Costo Total:					\$ 591.58

Nota: La Tabla presenta los parámetros iniciales establecidos para el diseño de la máquina termoformadora de acuerdo a los parámetros electrónicos.

6.6.2. Diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas

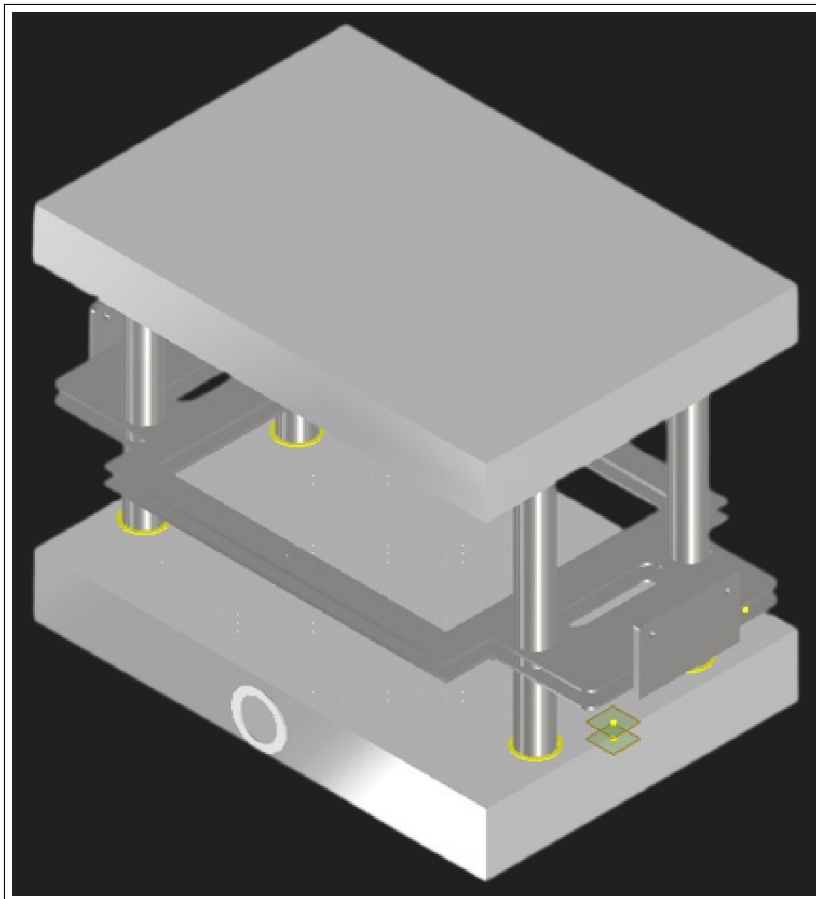
6.6.2.1. Animación

En el diseño del equipo de termoformado se requirió una comprensión profunda de los parámetros involucrados para poder determinar dimensiones y espacios que permitan acoplar los diferentes elementos y controlar algunos de ellos. En el diseño propuesto también se consideró la selección de los materiales para algunos componentes, tomando en cuenta los

aspectos clave del diseño, como la seguridad, la eficiencia y la robustez, para garantizar la calidad de la máquina termoformadora.

Figura 6.40

Animación de la máquina termoformadora.



Nota: En la Figura se observa una captura de la animación del diseño final de la máquina termoformadora.

6.6.2.2. Planos del equipo para termoformado

En Los planos se detallan todos los aspectos técnicos de la máquina termoformadora y de cada uno de sus elementos, desde los componentes necesarios para su operación o funcionamiento, además de los datos específicos y detallados para la construcción y acople de los mismos. Estos planos son indispensables para la construcción y asegurar que la máquina termoformadora cumpla con los estándares de calidad requeridos por la industria en todos los aspectos de calidad y seguridad. En el Anexo B se presentan todos los planos detalladamente cómo se construye y arma cada parte de la máquina termoformadora.

6.6.3. Evaluación del diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas

La Tabla 6.12 presentan los datos calculados de acuerdo al balance de energía de la lámina de PVC establecida en la ecuación 5.5:

$$\frac{m_L \times C_{prom} \times (T_{i+1} - T_i)}{\Delta t} = A_1 F_{1-2} \times \sigma \times (T^4 - T_i^4)$$

Los datos calculados son comparados con respecto a los datos simulados de acuerdo al modelo matemático del software. Se considera una lámina de 0.5 mm de espesor y se calcula la temperatura en referencia a un tiempo que varía cada segundo.

Tabla 6.12

Resultados de la temperatura de radiación en una lámina de 0.5 mm de espesor a una variación de tiempo de 1 s.

Tiempo [s]	Calculado [°C]	Simulado[°C]
0	16.85	16.85
1	33.6	20.09
2	49.66	33.67
3	64.93	47.25
4	79.34	60.83
5	92.83	74.41
6	105.34	87.99
7	116.85	101.58
8	127.34	115.16
9	136.82	128.74
10	145.31	142.32
11	152.86	155.9

Nota: En la Tabla se indican los resultados obtenidos de los datos calculados y simulados de la temperatura en una variación de tiempo de un segundo con una espesor lámina de PVC de 0.5mm.

De igual manera, la Tabla 6.13 presenta los resultados de la temperatura calculada y simulada considerando una lámina de PVC de 1 mm de espesor.

Tabla 6.13

Comparación de los resultados calculados con los resultados simulados.

Tiempo [s]	Calculado [°C]	Simulado [°C]
0	16.85	16.85
1	25.2	20.06
2	33.38	23.04
3	41.39	26.02
4	49.21	28.99
5	56.83	31.97
6	64.25	34.94
7	71.45	37.92
8	78.43	40.90
9	85.19	43.88
10	91.71	46.85
11	97.99	49.83
12	104.02	52.81
13	109.81	55.78
14	115.35	58.76
15	120.65	61.74
16	125.7	76.90
17	130.5	90.26
18	135.07	104.52
19	139.4	118.78
20	143.49	133.04
21	147.36	147.3

Nota: La Tabla indica los resultados de temperatura y tiempo con una espesor lámina PVC de 1mm.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 6.13 sobre los datos calculados con respecto a los datos simulados, se puede constatar que, a los 21 segundos la lámina PVC de 1 mm de espesor se aproxima a la temperatura de plastificación o de termoformado que es aproximadamente a 150 °C, mientras que a los 22 segundos se sobrepasa esta temperatura por lo que no se considera los datos superiores.

7. Cronograma y actividades

Tabla 7.1

Cronograma de actividades.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																																															
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5				MES 6				HORAS																					
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4																						
Establecer los parámetros iniciales para el diseño mecánico y electrónico de una maquina de termoformado para la elaboración de moldes de plástico.	Revisión bibliográfica de las máquinas termoformadoras.	x																								20																					
	Revisión del estudio del arte de las maquinas para termoformado.	x																								10																					
	Establecimiento de propuestas para el diseño.		x																							4																					
	Establecimiento de las condiciones iniciales dela máquina termoformadora.			x																						4																					
Proponer el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas.	Elaboración del diseño mecánico.				x	x	x	x	x																	100																					
	Elaboración del diseño electrónico y de control.									x	x	x	x	x												100																					
	Revisión de los diseños elaborados.														x											4																					
	Depuración de los diseños elaborados.															x										4																					
Evaluar el diseño mecanico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas.	Selección del software para implementar la simulación.																							x		2																					
	Implementación de la simulación.															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	60																					
	Revisión de la simulación.																								x	2																					
	Redacción de documento	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	90																					
Total de horas empleadas																																															400

Nota: La tabla presenta las actividades desarrolladas para cumplir con los objetivos planteados.

8. Presupuesto

8.1. Recursos materiales

La tabla 8.1 presenta los recursos materiales que serán utilizados para el desarrollo de la investigación.

Tabla 8.1

Recurso Materiales.

Denominación	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Computador	2	700	1400 \$
Software Inventor	1	2190	2190 \$
Software Ansys licencia academica	1	28760	28760 \$

Nota: En la Tabla se observa los costos establecidos en el desarrollo del trabajo de titulación.

9. Conclusiones

Conclusión 1:

Los parámetros iniciales obtenidos se basaron en el área de la mecánica, electrónica, control, ergonomía y seguridad que permitieron cumplir con las normativas de diseño de máquinas industriales. Además, se consideró el espacio físico donde se instalará la máquina y su operación, considerando la posición del operario y el peso que se manipula.

Conclusión 2:

El diseño propuesto considera una máquina termoformadora de 250 mm de ancho, 362 mm de largo y 289 mm de alto con bases de aluminio y guías cilíndricas de acero inoxidable que abarcan el sistema de calefacción que alcanza los 200 °C con un posicionamiento de la lámina en una placa flotante donde la forma es provocada por vacío con una bomba de succión de 3 HP de potencia.

Conclusión 3:

De acuerdo a los datos obtenidos se puede concluir que para la lámina de 0.5 mm de espesor existe una diferencia promedio del 11% de diferencia entre los datos calculados y los simulados, donde se puede aceptar los datos simulados para optimizar el proceso. En las simulaciones de la lámina de 1 mm de espesor la diferencia promedio es de 31%, donde se debe considerar de acuerdo a la experiencia si los datos se aceptan para futuras optimizaciones en el diseño de la máquina.

10. Recomendaciones

Recomendación 1:

Para estudios posteriores se puede considerar el efecto de la velocidad del viento exterior en la convección o radiación entre la fuente de calor y la lámina.

Recomendación 2:

Para la operación de la máquina se puede considerar elementos mecanizados y no comerciales para disminuir el tamaño de la misma.

Referencias Bibliográficas.

- Acevedo Obando, G. P., Riega, C., Gabriel, J., y cols. (2015). Automatización del sistema de termoformado para optimizar los tiempos de termoformado de laminas de pet.
- Alfaro, V. M. (2001). Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo cerrado. *Ingeniería*, 11(1-2), 27–41.
- alfer. (2022). *Lámina perforada con agujeros redondos*. Descargado 23 Octubre 2022, de <https://products.alfer.com/es/articulos-de-hierro/sistema-combitech-modelismo/laminas-perforadas-y-laminas-desplegadas/lamina-perforada-con-agujeros-redondos-aluminio-anodizado.html>
- Alibaba. (2022). *Placa calefactora de cerámica infrarroja industrial, elemento calentador de placa eléctrica de 220v, 240x60mm*. Descargado 26 Octubre 2022, de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Major-Heat-220v-240x60mm-Industrial-Infrared-1600506271389.html>
- Amazon. (2021). *Tornillo de bola de guía lineal de 100 mm de longitud de viaje sfu1605 diy cnc router parts x y z linear stage actuador con motor paso a paso nema17*. Descargado 26 Octubre 2022, de <https://www.amazon.es/longitud-lineal-tornillo-Sfu1605-Actuador/dp/B07DC42DLW?th=1>
- Amazon. (2022). *Eason controlador de motor paso a paso tb6600 4a dc9-42v 32 subdivisión para nema 17, 23 series motor paso a paso cnc controlador de un solo eje híbrido microstepping*. Descargado 26 Octubre 2022, de <https://www.amazon.com>
- Arbeláez-Toro, J. J., Rodríguez-Ledesma, C. A., Hincapié-Zuluaga, D. A., LEÓN-Simanca, P., Torres-López, E. A., y Loiza Upegui, L. A. (2019). Intervención tecnológica para la reconversión y automatización de una máquina termoformadora por vacío de una sola estación. *Revista EIA*, 16(32), 181–194.
- Area Tecnológica. (2022). *Estructuras metálicas*. Descargado de <https://www.areatecnologia.com/estructuras/estructuras-metalicas.html>
- Arrieta, V. (2018). *Control de motores a pasos con tb6600 y arduino*. Descargado 26 Octubre 2022, de <https://www.arcaelectronica.com/blogs/tutoriales/control-de-motores-a-pasos-con-tb6600-y-arduino>
- Aseplast. (2017). *Guía de la industria plástica [Manual de software informático]*. Descargado de https://issuu.com/aseplasocecuaplásticos/docs/guia_de_la_industria_aseplas
- Bejarano, J. (2003). Termoformado del compuesto polietileno de alta densidad con re-

- fuerzo lignocelulosico. , 10. Descargado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/21091/u246038.pdf?sequence=1>
- Bejarano Arévalo, J. L., y cols. (2004). Termoformado del compuesto polietileno de alta densidad con refuerzo lignocelulosico.
- Brusil Arellano, E. G. (2016). *Automatización del proceso de termoformado para la elaboración de moldes de chocolate en la empresa “golosinas y algo más”* (B.S. thesis).
- Burns, R. A. (2004). *Fundamentos de química, 1*. Pearson education.
- Calderón Garrido, C. F. (2014). *Diseño, desarrollo, fabricación e implementación de un kit de over fenders termoformados y su matricería para el vehículo peugeot 206 mediante el uso de los softwares autodesk inventor, autocad y adobe illustrator* (B.S. thesis). Quito/UIDE/2014.
- Calle Cabrera, A. J., Sánchez Marcillo, M. A., y cols. (2017). *Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio* (B.S. thesis). Espol.
- Cengel, Y. A., y Ghajar, A. J. (2007). *Transferencia de calor y masa* (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana.
- Cervera, E., Miguel; Blanco. (2001). *Mecánica de estructuras libro 1 resistencia de materiales* (1.ª ed.; UPC, Ed.). Descargado de http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Mecánica_de_estructuras_I_Resistencia_de_Materiales.pdf
- Circuitarte. (2022). *Termostato rex-c100 – pid control de temperatura*. Descargado 28 Noviembre 2022, de <https://www.circuitarte.com/producto/rex-c100/>
- Dismetal. (2022). *Planchas de aluminio liso*. Descargado 23 Octubre 2022, de <https://dismetal.ec/productos/planchas/aluminio-liso>
- Electrogeek. (2022). *Cómo controlar un motor paso a paso con el a4988 y arduino*. Descargado 26 Octubre 2022, de <https://www.electrogeekshop.com/como-controlar-un-motor-paso-a-paso-con-el-a4988-y-arduino/>
- Electronilab. (2022). *Driver microstepper motor paso a paso – tb6600 – 0.5-4a 12-40vdc*. Descargado 26 Octubre 2022, de <https://electronilab.co/tienda/driver-microstepper-motor-paso-paso-tb6600-0-2-5a-12-48vdc/>
- Forero Lopez, D. F., Santana Acero, D. E., y cols. (2018). Diseño de máquina termoformadora didáctica para el laboratorio de materiales de ingeniería de la universidad distrital francisco jose de caldas.
- García Reino, V. E. (2016). Experimentación de polímeros para generar un sistema de paneles termoformados en revestimientos interiores.
- Gomis, A. M. (2012). *Tecnología de polímeros. procesado y propiedades*. Universidad de Alicante.
- González Fernández, M. (2022). *Plan de competitividad del sector empresarial de las industrias del plástico de la comunidad valenciana* (Tesis Doctoral no publicada). Universitat Politècnica de València.
- Google Maps. (2023).

- Descargado de maps.google.com
- Hui, T. (2022). *Acero plano de acero inoxidable 304*. Descargado 24 Octubre 2022, de <http://www.sxthsspipe.com/stainless-steel-profile/stainless-steel-flat-steel/304-stainless-steel-flat-steel.html>
- Icropera. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (Vol. Sixth Edition). R.R. Donnelley.
- Kreith, F., y Manglik, R. M. (2016). *Principles of heat transfer*. Cengage learning.
- La Paloma. (2023). *Celorón y baquelita*. Descargado de https://www.lapaloma.com.mx/lapaloma_metales/celoron_baquelita.html
- Luis, M., y Fabián, M. (2015). Diseño y construcción de una máquina termoformadora de plástico con control automático para la empresa miviltech soluciones industriales s.a.
- Making, E. (2013). *Project: Semi-automated vacuum former*. Descargado 23 Octubre 2022, de <http://embraceracing.blogspot.com/p/projects.html?m=1>
- Mata, F. (2004). *Aspectos ergonómicos en el diseño de máquinas*. Descargado de <https://www.prevencionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2004/aspectos-ergonomicos-en-diseno-maquinas>
- MCI. (2022). *Motor paso a paso nema 23 (200 pasos)*. Descargado 26 Octubre 2022, de <https://mcielectronics.cl/shop/product/motor-paso-a-paso-nema-23-200-pasos-22571/>
- Mercado Libre. (s.f.). *Voltaje de salida: 12v dc, corriente max.: 5a dc*. Descargado de https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-515853983-fuente-de-poder-12v-5a-JM#rec_item_pos=0&reco_backend=machinalis-v2p&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-v2p&reco_id=a12e8af0-3f36-46a9-a28a-1ebce5105c21
- Molina, O. (2019). *La importancia de la capacitación tecnico profesional como alternativa para la juventud*. Cengage learning. Descargado de <https://www.eljaya.com/64707/la-importancia-de-la-capacitacion-tecnico-profesional-como-alternativa-para-la-juventud/>
- Morales, R., y Candal, M. (2006). Diseño y fabricación de un molde de termoformado utilizando herramientas cad/cae. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 21(1), 83–99.
- Moreno Martínez, N., Font Moll, V., y Ramírez Maciel, J. C. (2016). La importancia de los diagramas en la resolución de problemas de cuerpos deformables en mecánica: el caso de la fuerza de fricción. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 24(1), 158–172.
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de materiales* (5.ª ed.). Pearson Education, Inc., publishing as PRENTICE HALL, INC., Copyright © 2008.
- Moya Utreras, A. R. (2016). *Análisis del proceso manual de termoformado de recipientes en láminas de pvc y su incidencia en la productividad de la empresa prosergraf* (B.S. thesis). Universidad Tecnológica Indoamérica.

- Norton, R. (2011). *Diseño de máquinas*. (4.^a ed.; L. M. C. Castillo, Ed.). Prentice Hall.
- Octal. (2022). *Tubería de acero inoxidable 304 y 316*. Descargado 24 Octubre 2022, de <https://www.octalacero.com/tuberia-de-acero-inoxidable-304-316>
- Paredes García, M. E. (1992). *Control analógico de presión mecánica* (B.S. thesis). Quito: EPN, 1992.
- Pérez, J. G. (2014). La industria del plástico en México y el mundo. *Comercio exterior*, 64(5), 6–9.
- Pérez Colibrí, K. A., y Vásquez Vásquez, D. A. (2021). *Repotenciación de una inyectora de plástico arburg allrounder 320m 500-210 del año 1992* (B.S. thesis).
- Peréz Ramos, V. P., y Chavarro León, B. J. (2012). *Diseño y construcción de una máquina de termoformado* (B.S. thesis).
- Pintulac. (2021). Aspiradora sopladora de 3 hp para seco/mojado stanley [Manual de software informático]. Descargado de <https://www.pintulac.com.ec/aspiradora-sopladora-3hp-seco-mojado-stanley.html>
- Pito Terán, E. R., y Molina Negrete, V. G. (2008). *Diseño de una termoformadora de envases plásticos* (B.S. thesis). QUITO/EPN/2008.
- Plastiglas, D., y De Cv, S. (1999). Manual técnico termoformado. *México, DF*.
- Plastiglas de México, S. d. C. (2012). Manual técnico termoformado. *Recuperado de <https://tecnologia3bunlp.files.wordpress.com/2015/03/manual-determoformado.pdf>*.
- Prototivad3D. (2023). *Usando las simulaciones computacionales para mejorar el diseño de bombas*. Descargado de <https://www.prototivad3d.com/2022/08/usando-las-simulaciones-computacionales.html>
- Rodríguez, P. (2012). Análisis de la relación estructura macromolecular - propiedades viscoelásticas - termoformabilidad de polímeros termoplásticos semicristalinos.
- Rojas, R., y Nelson, J. (2019). *Automatización de una máquina termoformadora múltiple a base de matrices cambiantes para la empresa multipaneles cia. ltda*.
- Sainsmart. (2018). *Tornillo de bola de guía lineal de 100 mm de longitud de viaje sfu1605 diy cnc router parts x y z linear stage actuador con motor paso a paso nema17* (Inf. Téc.). Descargado de <https://www.amazon.es/longitud-lineal-tornillo-Sfu1605-Actuador/dp/B07DC42DLW?th=1>
- Savage, A. D. (2016). *Dp*. KRILL PRESS. Descargado de https://www.amazon.com/dp/B07QG3X6KQ?tag=yaesta02-20&linkCode=ogi&th=1&language=es_US
- Slheater. (2022). *Calentador de cerámica infrarrojo cuadrado de 122x122 mm*. Descargado 13 Noviembre 2022, de <http://m.heaterelements.mfg.com/heaters/ceramic-infrared-heaters/120x120mm-square-infrared-ceramic-heater.html>
- Spínola Romero, R. (2001). Moldeo por termoconformado de plástico. *Monografías de arte: 2000-2001*.
- Statista. (2021, diciembre). Porcentaje de residuos procedentes de envases reciclados en

- europa (ue-28+2) en 2018, por país. Descargado de <https://es.statista.com/estadisticas/1122222/tasa-de-reciclaje-de-envases-por-pais-en-europa/>
- Suárez, J., Suárez, X., y Contreras, R. (2001). Comportamiento de 3 familias de aceros inoxidables ante solicitudes tribológicas de abrasión y erosión. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 21(2), 74–80.
- Taxnele. (2022). *Controlador de temperatura pid rex-c100 combo*. Descargado 26 Octubre 2022, de <https://www.ocompra.com/ecuador/item/temostato-rex-c100-ssr-pid-kit-controlador-temperatura-220v-518492828/>
- Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. (2022). *Altura de plano de trabajo en posición de pie*. Descargado de <https://www.ulpgc.es/sprlyupr/trabajodepie>
- Vargas-Isaza, C. A., Posada-Correa, J. C., Jaramillo-Zapata, L. Y., y García, L. A. (2015). Consumos de energía en la industria del plástico: revisión de estudios realizados (energy consumption in plastic industry-review of studies developed). *Revista CEA*, 1(1).
- Viteri, C., Nicolás, E., Salazar Martínez, K. D., y Figueroa Montiel, P. R. (2021). Diseño y construcción de una máquina de termoformado por compresión para la fabricación.
- xiao shenlin. (2022). *Controlador de temperatura rex-c100*. Descargado 28 Noviembre 2022, de <https://www.omch.co/es/rex-c100-temperature-controller/>

ANEXOS

Anexo A: Matriz de consistencia lógica

Tabla 10.1

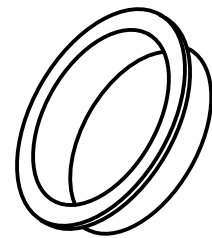
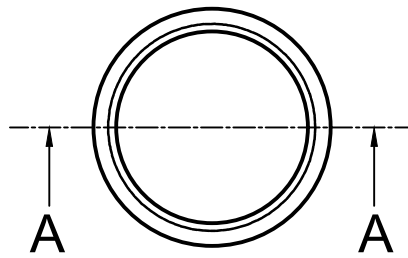
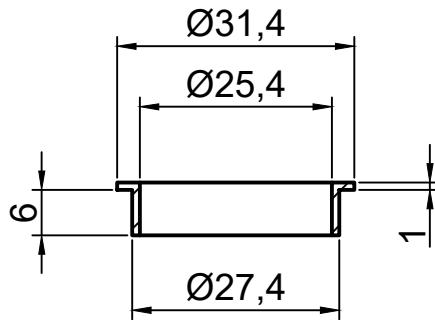
Matriz de consistencia lógica.


PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Es factible diseñar una máquina de termoformado para la elaboración de piezas de plástico?	Diseñar una máquina de termoformado para la elaboración de piezas de plástico.	Se Diseñara una máquina de termoformado para la elaboración de piezas de plástico.s.		Máquina de termoformado.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Se podrá establecer los parámetros iniciales para el diseño mecánico y electrónico de una máquina de termoformado para la elaboración de moldes de plástico ?	Establecer los parámetros iniciales para el diseño mecánico y electrónico de una maquina de termoformado para la elaboración de piezas de plástico.	Se establecerán los parámetros iniciales para el diseño mecánico y electrónico de una maquina de termoformado para la elaboración de moldes de plástico.	-VI: Parámetros. -VD: Diseño mecánico y electrónico.	Máquina de termoformado
¿Es posible proponer el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas?	Proponer el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas.	Sé propondrá el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas.	-VD: Diseño mecánico y electrónico.	Piezas plásticas.
¿Se logrará evaluar el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas?	Evaluar el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas.	Se evaluará el diseño mecánico y electrónico de una máquina termoformadora utilizada en la elaboración de piezas plásticas.	-VD: Diseño mecánico y electrónico.	Diseño mecánico y electrónico

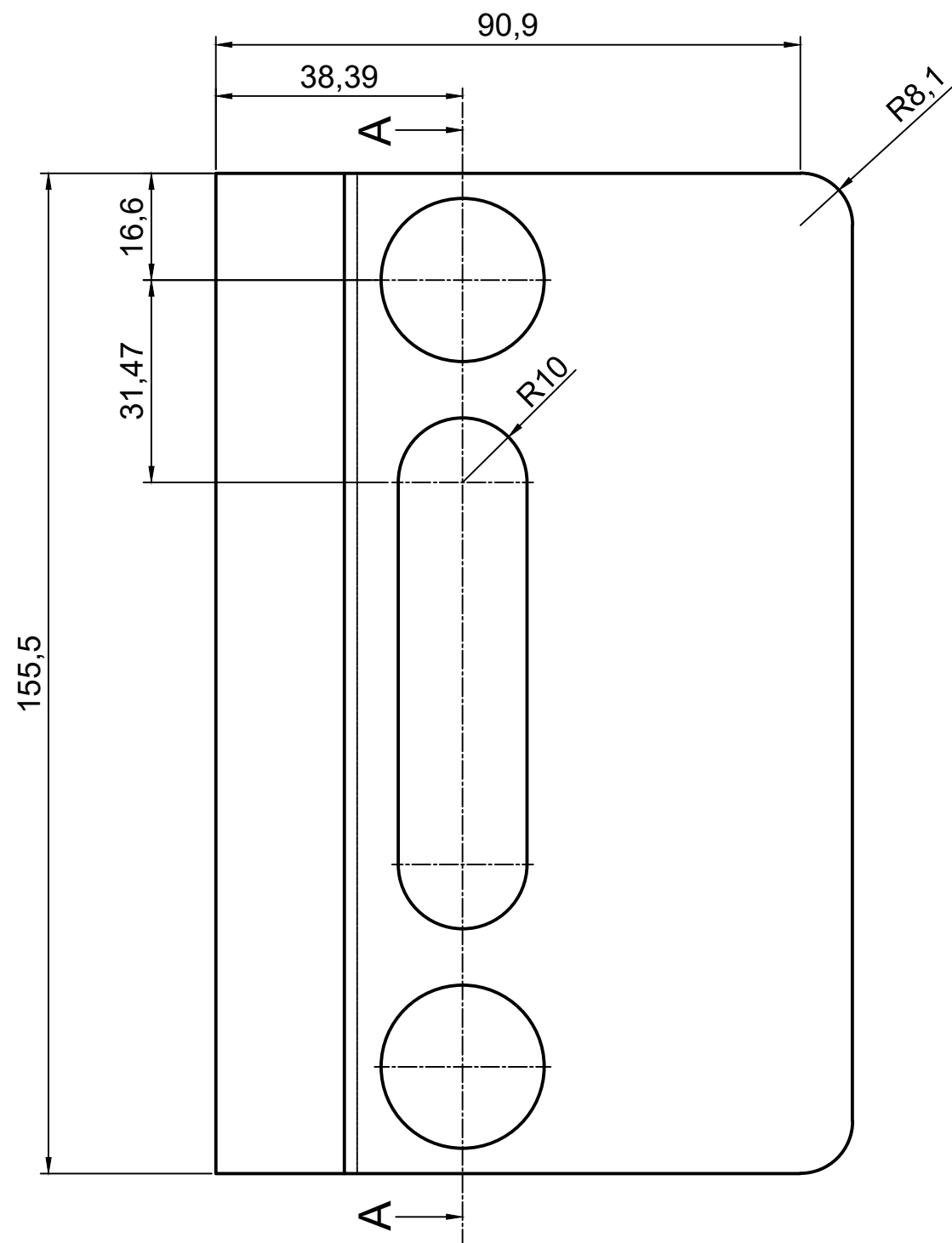
Nota: Relación entre los problemas, objetivos, hipótesis, variables y marco teórico planteado de acuerdo al Anexo 10.

Anexo B: Planos de una máquina termoformadora para la elaboración de piezas plásticas

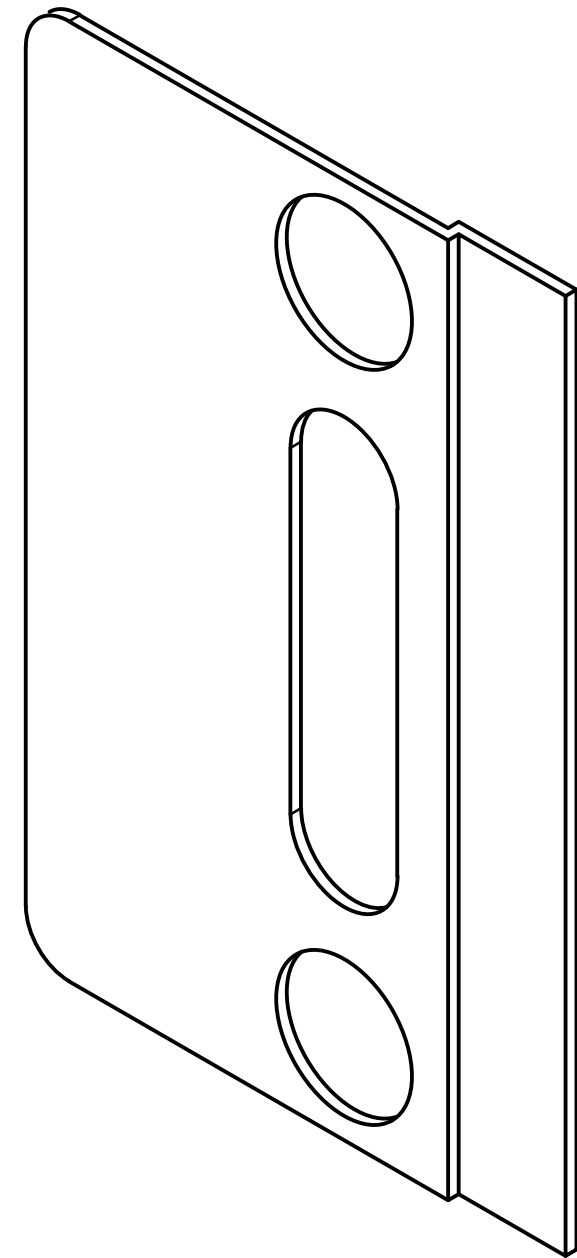
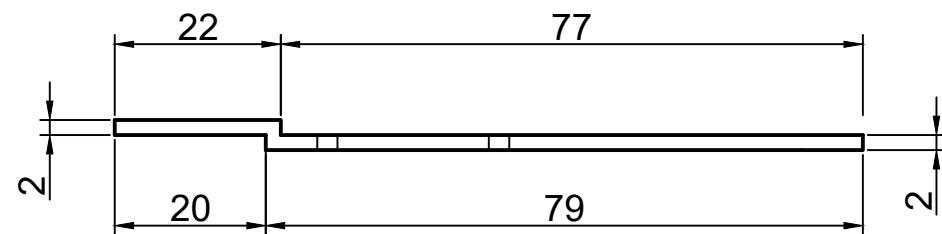
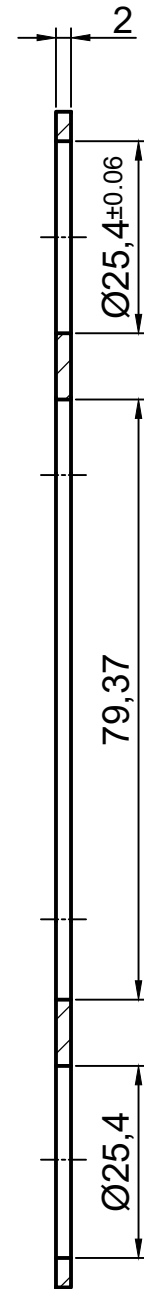
CORTE A-A



	4	<i>Union Inferior Primaria</i>		<i>PLA</i>		mm
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
X CICLO		Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA	
Dibujado		<i>25/12/22</i>	<i>Alvaro Z, Laura M</i>			
Comprobado		<i>26/12/22</i>	<i>Ing. Luis Lopez</i>			
				INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecánica		
Escala:	Tol. gen.:	Subconjunto:				
<i>1:1</i>	<i>ISO 2768-m</i>	Union Inferior Primaria				
Lámina:						
<i>01</i>						



CORTE A-A.



----	1	Manija De Marco Portalámina	Acero Inox.304		Medida en mm
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Norma	Notas
X CICLO	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecatrónica		
Dibujado	25/12/22	Alvaro Z, Laura M			
Comprobado	26/12/22	Ing. Luis Lopez			
Escala: 1:1			Tol. gen.: ISO 2768-m		Subconjunto:
Lámina: 02			Manija De Marco Portalámina		