



**Diseño y construcción de una termoformadora con sistema de control de temperatura
para replicar moldes de prótesis para la empresa APM ELECTRONICS**

Caluguillín Guamán, Bryan Andrés

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

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

Ing. Cortez Pazmiño, Byron Hernán

20 de agosto de 2023

Bryan Caluguillín - ParaVerificar.pdf

Scan details

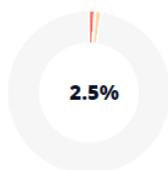
Scan time:
August 10th, 2023 at 21:18 UTC

Total Pages:
48

Total Words:
11788



Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
● Identical	1.1%	132
● Minor Changes	0.2%	23
● Paraphrased	1.1%	134
● Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage

- AI text
- Human text



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: "**Diseño y construcción de una termoformadora con sistema de control de temperatura para replicar moldes de prótesis para la empresa APM ELECTRONICS**" fue realizado por el señor **Caluguillín Guamán, Bryan Andrés**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de julio de 2023.

Cortez Pazmiño, Byron Hernán

C. C.: 1714471081





Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Caluguillín Guamán, Bryan Andrés**, con cédula de ciudadanía N°: **1721810933**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño y construcción de una termoformadora con sistema de control de temperatura para replicar moldes de prótesis para la empresa APM ELECTRONICS** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 15 de julio de 2023

Caluguillín Guamán, Bryan Andrés

C.C.: 1721810933



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo **Caluguillín Guamán, Bryan Andrés**, con cédula de ciudadanía N°: **1721810933**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño y construcción de una termoformadora con sistema de control de temperatura para replicar moldes de prótesis para la empresa APM ELECTRONICS** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 15 de julio de 2023

Caluguillín Guamán, Bryan Andrés

C.C.: 1721810933

Dedicatoria

A mamá y papá, les dedico este trabajo, es el fruto de su esfuerzo, lo logramos juntos.

A Josefina, mamita siempre vivirás en mis recuerdos más hermosos.

Bryan Andrés Caluguillín Guamán

Agradecimiento

Agradezco a mis padres, Carlos y Susana, por todo su amor, por su esfuerzo incansable, por priorizar mi educación antes que todo, porque sin ellos nada de esto sería posible, pero sobre todo les agradezco por confiar siempre en mí.

Agradezco a Anita y Bolívar, por quererme como si fuera su hijo, por estar pendientes a pesar de la distancia y por apoyarme en todo momento, sobre todo en mi vida estudiantil.

Agradezco a mi pareja, Verónica, por incentivarne a culminar esta etapa tan importante, por recordarme que soy capaz de lograr todo lo que siempre me propuse, por todo su apoyo y su cariño.

Agradezco a mi tutor por su invaluable ayuda al guiar el correcto desarrollo de este proyecto que me permite culminar mi vida universitaria.

Agradezco a todos los buenos maestros que compartieron un poco de su sabiduría conmigo.

Bryan Andrés Caluguillín Guamán.

Índice de contenidos

Resumen.....	17
Abstract.....	18
Capítulo 1.....	19
Generalidades.....	19
Antecedentes.....	19
Justificación e importancia.....	19
Alcance.....	20
Objetivos.....	21
Objetivo general.....	21
Objetivos específicos.....	21
Capítulo 2.....	22
Marco teórico.....	22
Descripción general del proceso de termoformado.....	22
Componentes del proceso de termoformado.....	23
Material.....	24
Lámina acrílica de uso general.....	28
Matriz o molde.....	30
Elementos calefactores.....	31
Aplicaciones del termoformado.....	33
Capítulo 3.....	35
Diseño mecatrónico.....	35

Despliegue de la función de calidad QFD	35
Requerimientos de calidad en términos de cliente.....	35
Actividades y parámetros del proceso	36
Matriz QFD.....	37
Definición de características.....	38
Definición de arquitectura	39
Desarrollo de conceptos	41
Módulo de estructura.....	41
Material.....	41
Dimensiones	42
Módulo de temperatura	42
Elementos calefactores.....	43
Sensor de temperatura	43
Controlador	46
Módulo de materia prima.....	47
Sujeción de las planchas	48
Módulo de aplicación de vacío	49
Bomba de vacío.....	50
Accionamiento	51
Selección de conceptos	52
Módulo de estructura.....	53

	10
Material.....	53
Módulo de temperatura	55
Elementos calefactores.....	55
Sensor de temperatura	56
Controlador	57
Módulo de materia prima.....	59
Sujeción de las planchas	59
Módulo de aplicación de vacío	60
Bomba de vacío.....	60
Diseño conceptual	61
Análisis estático de elementos estructurales.....	65
Análisis térmico del sistema de temperatura	68
Cálculo de potencia de actuadores.....	68
Diseño del controlador de temperatura	70
Control PID.....	70
Capítulo 4.....	82
Construcción y evaluación.....	82
Proceso de construcción.....	82
Análisis de funcionamiento	89
Pruebas de funcionamiento.....	89
Análisis de medidas de los moldes termoformados	92

Capítulo 5.....	97
Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	97
Conclusiones	97
Recomendaciones	97
Trabajos futuros.....	98
Bibliografía	99
Apéndices	101

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Características iniciales solicitadas por el cliente</i>	20
Tabla 2	<i>Polímeros usados en el termoformado y sus temperaturas de trabajo</i>	25
Tabla 3	<i>Gravedad específica, calor específico y conductividad térmica de los materiales</i>	27
Tabla 4	<i>Propiedades mecánicas y térmicas de la lámina acrílica de uso general</i>	29
Tabla 5	<i>Requerimientos en términos del cliente</i>	35
Tabla 6	<i>Parámetros de la termoformadora, importancia y unidades</i>	36
Tabla 7	<i>Matriz QFD de la máquina termoformadora</i>	38
Tabla 8	<i>Características iniciales de la máquina</i>	39
Tabla 9	<i>Funciones de los submódulos de la máquina termoformadora</i>	40
Tabla 10	<i>Características de las opciones del material</i>	42
Tabla 11	<i>Ventajas y desventajas de los métodos para calentar el material</i>	43
Tabla 12	<i>Comparación termocupla tipo K - MAX6675 vs PT100 - MAX31865</i>	45
Tabla 13	<i>Características de ESP32 y ATMEGA 328P</i>	47
Tabla 14	<i>Ventajas y desventajas de las opciones de sujeción del material</i>	49
Tabla 15	<i>Características técnicas de las bombas de vacío</i>	51
Tabla 16	<i>Ventajas y desventajas de las opciones de accionamiento de la bomba de vacío</i>	52
Tabla 17	<i>Importancia de parámetros del material estructural</i>	54
Tabla 18	<i>Matriz de selección del material estructural</i>	54
Tabla 19	<i>Importancia de parámetros de los elementos calefactores</i>	55
Tabla 20	<i>Matriz de selección de elementos calefactores</i>	56
Tabla 21	<i>Importancia de parámetros del sensor de temperatura</i>	56
Tabla 22	<i>Matriz de selección del sensor de temperatura</i>	57
Tabla 23	<i>Importancia de parámetros del controlador</i>	58

Tabla 24	<i>Matriz de selección del controlador</i>	58
Tabla 25	<i>Importancia de parámetros del método de sujeción del material base</i>	59
Tabla 26	<i>Matriz de selección del método de sujeción del material base</i>	59
Tabla 27	<i>Importancia de parámetros de la bomba de vacío</i>	60
Tabla 28	<i>Matriz de selección de la bomba de vacío</i>	61
Tabla 29	<i>Características del diseño conceptual de la termoformadora</i>	62
Tabla 30	<i>Resultados de análisis estático</i>	67
Tabla 31	<i>Constantes del controlador</i>	80
Tabla 32	<i>Medidas de control del molde original</i>	93
Tabla 33	<i>Medidas de las pruebas realizadas</i>	94
Tabla 34	<i>Análisis de medidas del eje menor</i>	94
Tabla 35	<i>Medidas de dispersión del eje menor</i>	95
Tabla 36	<i>Medidas de dispersión de las medidas de control del molde</i>	95
Tabla 37	<i>Cálculo de errores de las medidas</i>	96

Índice de figuras

Figura 1	<i>Esquema del proceso de termoformado</i>	23
Figura 2	<i>Material termoplástico en estado ahulado por incremento de temperatura</i>	25
Figura 3	<i>Láminas de PMMA</i>	28
Figura 4	<i>Molde para termoformado de cubiertas internas de congeladores</i>	31
Figura 5	<i>Resistencias eléctricas de uso industrial</i>	32
Figura 6	<i>Radiadores infrarrojos en funcionamiento</i>	33
Figura 7	<i>Aplicaciones del termoformado</i>	34
Figura 8	<i>Arquitectura modular de la máquina termoformadora</i>	40
Figura 9	<i>Termocupla K y módulo MAX6675</i>	44
Figura 10	<i>PT100 y módulo MAX 31865</i>	45
Figura 11	<i>Tarjeta de desarrollo ESP32</i>	46
Figura 12	<i>Microcontrolador ATMEGA328P</i>	47
Figura 13	<i>Pinzas metálicas de sujeción</i>	48
Figura 14	<i>Tornillo y tuerca mariposa</i>	49
Figura 15	<i>Bomba de vacío Quality QVP6002V</i>	50
Figura 16	<i>Bomba de vacío Everwell 1LVP-5MP</i>	51
Figura 17	<i>Diseño conceptual de la estructura de la máquina termoformadora</i>	63
Figura 18	<i>Diseño conceptual del tablero de control</i>	64
Figura 19	<i>Diseño conceptual del sistema de control de temperatura en lazo cerrado</i> ...64	
Figura 20	<i>Modelado de estructura</i>	65
Figura 21	<i>Mallado del modelo CAD</i>	65
Figura 22	<i>Análisis de tensiones de la estructura</i>	66
Figura 23	<i>Análisis de desplazamiento en la estructura</i>	67
Figura 24	<i>Relé de estado sólido</i>	70
Figura 25	<i>Sistema de lazo abierto para obtención de función de transferencia</i>	71

Figura 26	<i>Programa de comunicación con hoja de datos parte 1.</i>	72
Figura 27	<i>Programa de comunicación con hoja de datos parte 2.</i>	73
Figura 28	<i>Interfaz de comunicación serial PLX-DAQ</i>	74
Figura 29	<i>Interfaz de salida PLX-DAQ</i>	75
Figura 30	<i>Respuesta de un sistema de primer orden ante un escalón unitario.</i>	76
Figura 31	<i>Diagrama de bloques de un sistema de primer orden.</i>	76
Figura 32	<i>Temperatura vs tiempo en lazo abierto.</i>	77
Figura 33	<i>Curva real de Aumento de temperatura vs tiempo.</i>	78
Figura 34	<i>Extracto de datos temperatura vs tiempo en $t=T$.</i>	79
Figura 35	<i>Curva modelada de temperatura vs tiempo.</i>	79
Figura 36	<i>Comparación de respuesta real vs modelado.</i>	80
Figura 37	<i>Estructura metálica de la termoformadora</i>	82
Figura 38	<i>Instalación de niquelinas.</i>	83
Figura 39	<i>Construcción de PCB de prueba del sistema de control de temperatura</i>	83
Figura 40	<i>Conexión del sistema de temperatura con PCB de prueba.</i>	84
Figura 41	<i>PCB del sistema de control.</i>	84
Figura 42	<i>Diseño de pistas de PCB.</i>	85
Figura 43	<i>Prueba de funcionamiento de PCB.</i>	85
Figura 44	<i>Construcción del tablero de control.</i>	86
Figura 45	<i>Montaje de elementos en tablero de control</i>	86
Figura 46	<i>Tablero de control.</i>	87
Figura 47	<i>Sistema de sujeción de planchas de acrílico</i>	88
Figura 48	<i>Torre de succión.</i>	88
Figura 49	<i>Termoformadora finalizada</i>	89
Figura 50	<i>Prueba de calentamiento de material</i>	90
Figura 51	<i>Contracción del material</i>	90

Figura 52 <i>Posicionamiento de las planchas de acrílico</i>	91
Figura 53 <i>Posicionamiento de la plancha sobre el molde</i>	92
Figura 54 <i>Molde termoformado</i>	92
Figura 55 <i>Medidas características del molde original</i>	93

Resumen

Este documento presenta el proceso de diseño y construcción de una máquina termoformadora con control de temperatura para la empresa “APM Electronics”, cuya aplicación es replicar moldes de prótesis de hombro con láminas de acrílico. La máquina se divide en 3 subsistemas: Diseño y construcción de la estructura, Diseño e implementación del sistema de control de temperatura y por último el sistema de manejo de la materia prima. El proceso se desarrolla en un conjunto de seis capítulos, el primer capítulo abarca las generalidades referentes al proyecto como el alcance, la justificación y los objetivos del mismo. En el segundo, muestra un resumen de conceptos y teoría sobre el proceso de termoformado y las partes que componen una máquina termoformadora. El siguiente capítulo, el tercero, aborda el diseño mecatrónico del proyecto mediante el uso de la matriz QFD y la selección de conceptos a utilizarse, seguido del análisis estático de la estructura mecánica, así como el dimensionamiento de las niquelinas en el sistema de temperatura. El cuarto capítulo describe el proceso de construcción y combinación de los subsistemas del proyecto, así como la verificación del funcionamiento de la termoformadora y un análisis estadístico de las medidas de control del producto terminado. Por último, el capítulo cinco presenta las conclusiones, recomendaciones y los trabajos a futuro que se pueden originarse del proyecto.

Palabras clave: termoformadora, matriz QFD, control de temperatura.

Abstract

This document presents the design and construction process of a thermoforming machine with temperature control for the company "APM Electronics", whose application is to replicate shoulder prosthesis molds with acrylic sheets. The machine is divided into 3 subsystems: Design and construction of the structure, design and implementation of the temperature control system and finally the raw material handling system. The process is developed in a set of six chapters, the first chapter covers the generalities concerning the project such as the scope, justification and objectives of the project. In the second, it shows a summary of concepts and theory about the thermoforming process and the parts that make up a thermoforming machine. The following chapter, the third one, deals with the mechatronic design of the project by using the QFD matrix and the selection of concepts to be used, followed by the static analysis of the mechanical structure, as well as the sizing of the nickel plating in the temperature system. The fourth chapter describes the process of construction and combination of the project subsystems, as well as the verification of the thermoforming machine operation and a statistical analysis of the control measurements of the finished product. Finally, chapter five presents the conclusions, recommendations and future work that can be derived from the project.

Keywords: thermoformer, QFD matrix, temperature control.

Capítulo 1

Generalidades

Antecedentes

APM ELECTRONICS es una empresa ecuatoriana con varios años en el mercado. Esta entidad tiene entre sus funciones, brindar al cliente el servicio de ingeniería para hallar soluciones innovadoras y multidisciplinarias que les permitan mejorar tanto en procesos, como en resultados.

Dentro de los servicios manejados por APM ELECTRONICS, se encuentra el diseño, planificación y construcción de máquinas con características mecánicas, electrónicas y de control, todo esto según los requerimientos de sus clientes.

APM ELECTRONICS, requiere la construcción de una máquina termoformadora que permita replicar un molde de prótesis de hombro, mismo que será suministrado por el solicitante del trabajo. Esta máquina debe cumplir una serie de requerimientos impuestos por el cliente, entre ellos, costo mínimo, capacidad de trabajo para láminas de acrílico de diversos espesores, entre otros que serán detallados minuciosamente en el capítulo 3.

Justificación e importancia

La innovación constante tanto en tecnología, como en maquinaria, permite que la investigación y desarrollo de una empresa siga dando buenos resultados en conjunto con el talento humano que esta posee.

El mercado local siempre está en busca de nuevas alternativas, que permitan mayores beneficios productivos, económicos o de investigación. La empresa solicitante del proyecto anteriormente replicaba los moldes de prótesis mediante manufactura aditiva, específicamente impresión 3D, sin embargo, este proceso es extenso y costoso, demora aproximadamente entre 17 horas a 19 horas de impresión por cada molde y un precio que se aproxima a los 50 USD por cada uno de ellos.

Por las razones antes mencionadas, buscamos construir una máquina termoformadora que permita el replicado de moldes de prótesis de hombro en tiempos más cortos y a costos más bajos.

Alcance

Para este proyecto se busca desarrollar una máquina termoformadora con las características solicitadas por el cliente, mismas que se detallan a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1

Características iniciales solicitadas por el cliente.

CARACTERISTICA	VALOR	OBSERVACION
Alto total	150 cm	Aproximado
Ancho total	80 cm	Aproximado
Profundidad total	80 cm	Aproximado
Temperatura mínima del interior	25 °C	Temperatura ambiente
Temperatura máxima del interior	200 °C	NA
Aislamiento térmico total	No	Priorizar la parte económica
Material a termoformar	Acrílico	NA
Medidas del material a termoformar	35 cm x 35 cm	Aproximado
Espesor del material a termoformar	2, 3 o 4 mm	NA
Control de temperatura	Si	Rango por determinar
Posicionamiento del material	Manual	Priorizar la parte económica
Extracción del material	Manual	Priorizar la parte económica
Accionamiento de la bomba de vacío	Manual o pedal	Priorizar la parte económica

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir una máquina termoformadora, con control de temperatura que permita deformar planchas de acrílico de 2, 3 y 4 mm de espesor para replicar moldes de prótesis de hombro.

Objetivos específicos

- Obtener los requisitos funcionales del diseño de la máquina a partir necesidades del cliente mediante el uso de la matriz QFD.
- Realizar el diseño mecánico de la máquina termoformadora, mediante el uso de software CAD para obtener el concepto previo a construir.
- Diseñar un sistema de lazo cerrado para controlar la temperatura interna de la máquina termoformadora.
- Dimensionar y seleccionar los sensores y actuadores del sistema.
- Implementar el sistema de control de temperatura en la estructura mecánica del sistema, mediante la construcción de un tablero de control que permita visualizar las variables en tiempo real.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se describe brevemente el proceso de termoformado, los componentes más comunes de las máquinas termoformadoras y los materiales utilizados en el proceso, así como un resumen de las aplicaciones que ofrece.

Descripción general del proceso de termoformado

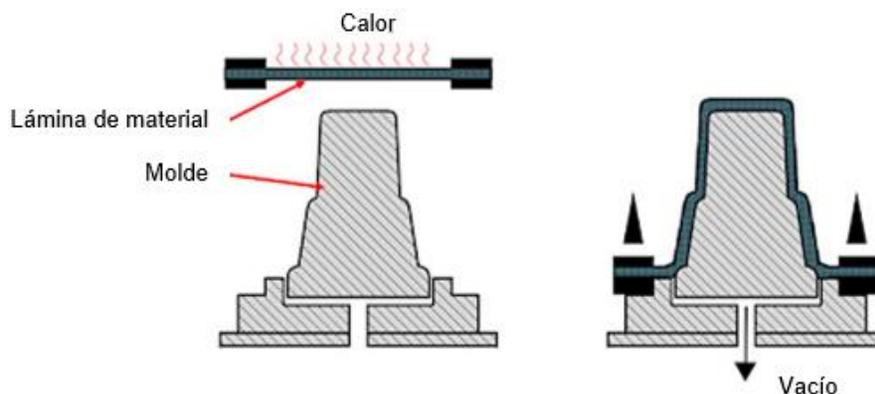
El termoformado es un proceso de manufactura utilizado para transformar láminas de materiales plásticos en formas tridimensionales mediante el uso de calor, vacío y presión (Singh & Zweben, 2002). Este proceso versátil encuentra aplicación en diversas industrias, desde la fabricación de envases y piezas automotrices hasta productos de consumo. Comienza con la selección de una lámina termoplástica, que se calienta hasta su punto de ablandamiento. Luego, la lámina se coloca sobre un molde y se aplica vacío, lo que permite que el material adopte la forma del molde. La presión adicional puede ser empleada para lograr detalles más precisos (Osswald & Menges, 2008). Finalmente, la pieza termoformada se enfría y se retira del molde.

El proceso de termoformado se puede dividir en varias etapas clave: precalentamiento de la lámina, formado, enfriamiento y desmoldeo (Brydson, 2017). Estas etapas son críticas para lograr productos consistentes y de alta calidad. La elección adecuada de materiales termoplásticos, ajuste de parámetros de temperatura y vacío, diseño de moldes precisos y control de la velocidad de enfriamiento son factores esenciales en el éxito del proceso (Kazmer, 2008).

El proceso inicia con la sujeción de una lámina de material termoplástico, luego se calienta, usualmente por radiación, hasta una determinada temperatura que permite el hundimiento del polímero para después presionar contra la superficie del molde mediante la aplicación de presión de aire o vacío, por último, se enfría y retira la placa del molde. En la Figura 1 se puede apreciar una ilustración general del proceso de termoformado.

Figura 1

Esquema del proceso de termoformado



Nota. La imagen muestra un esquema del proceso de precalentamiento y posicionamiento de la lámina sobre el molde, así como la aplicación de vacío. Tomado de <https://www.dekmake.com/es/diferencia-entre-moldeo-por-inyecci%C3%B3n-y-termoformado/>

Componentes del proceso de termoformado

Una máquina termoformadora está compuesta por diversos componentes interconectados que trabajan en conjunto para llevar a cabo el proceso de termoformado de manera eficiente y precisa. Estos elementos clave incluyen, en primer lugar, el material base, el cual generalmente son láminas termoplásticas. Luego, se encuentra el horno de calentamiento, encargado de elevar la temperatura de la lámina hasta su punto de ablandamiento mediante radiación infrarroja o calentadores eléctricos. Una vez calentada, la lámina es transferida al área de formado, donde un molde define la geometría deseada de la pieza. La activación de un sistema de vacío y, en algunos casos, presión, permite que la lámina adopte la forma del molde. A continuación, el material es enfriado y, por último, los dispositivos de desmoldeo liberan la pieza del molde y la mueven a la siguiente etapa del proceso. En conjunto, estos componentes aseguran la transformación efectiva de láminas termoplásticas en productos finales con precisión y repetibilidad en la máquina termoformadora.

Se realiza un análisis de los principales componentes a usarse en el proyecto.

Material

La sección actual reúne una breve revisión de las características y propiedades de los materiales usados como materia prima en el termoformado.

El termoformado es una combinación de las operaciones de embutido y ensanchamiento, el material que se use en este proceso, debe tener una elongación elevada y uniforme, caso contrario, se estrangulará y fallará, es decir se romperá (Kalpkjian & Schmid, 2008).

Los materiales termoplásticos reúnen las características necesarias para el proceso de termoformado, debido a que su exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación es alto, como consecuencia, estos materiales cuentan con una elevada capacidad de elongación uniforme.

Los termoplásticos sometidos a un incremento de temperatura cuyo resultado supere la temperatura de deflexión térmica (HDT), sufren un cambio físico, el material tenderá a convertirse hacia un estado ahulado, esto se puede evidenciar con el pandeo de una lámina del material, donde la fuerza de gravedad es suficiente para provocar dicha deformación (PLASTIGLAS, 2020).

En la Figura 2 se puede apreciar un ejemplo del estado ahulado de una lámina de acrílico por efecto del aumento de temperatura.

Figura 2

Material termoplástico en estado ahulado por incremento de temperatura



El estudio de las propiedades de los termoplásticos aptos para el proceso de termoformado implica una amplia investigación, sin embargo, ese tópico no está dentro de nuestro interés actual, por lo cual, se muestra un resumen de los polímeros más comunes usados en el proceso de termoformado en la Tabla 2, junto con su temperatura de deflexión al calor y la temperatura requerida para el termoformado, así como las propiedades térmicas de varios materiales en la Tabla 4.

Tabla 2

Polímeros usados en el termoformado y sus temperaturas de trabajo.

Polímeros	Temperatura de deflexión 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	100		160-180	65-75	
Acetobutirato de celulosa	65-75	75-80	120-150	140-160		

Polímeros	Temperatura de deflexión 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)
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. Esta tabla muestra los rangos de temperatura usados en el proceso de termoformado para cada material. Tomado de: (PLASTIGLAS, 2020)

Por lo mostrado en la Tabla 2, se puede identificar que la temperatura de trabajo para el termoformado, generalmente varía entre los 135°C y 230°C. De esta manera se obtiene una referencia del intervalo de funcionamiento del control de temperatura a implementarse en la máquina.

Tabla 3

Gravedad específica, calor específico y conductividad térmica de los materiales.

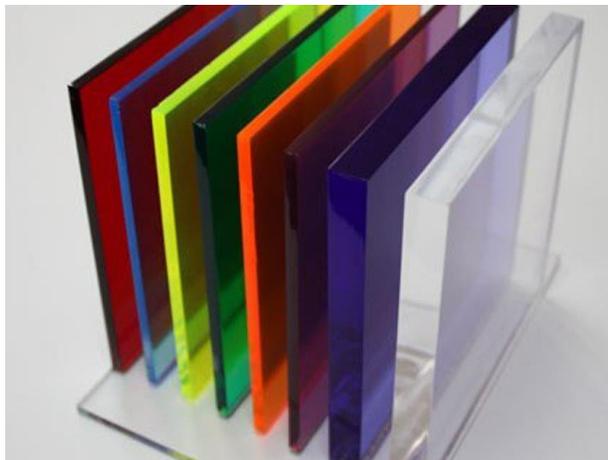
Materiales	Gravedad específica g/cm³	Calor específico BTU/lb°F	Conductividad térmica BTU.ft/ft²hr.°F
Aire	0.0012	0.24	0.014
Agua	1	1	0.343
Hielo	0.92	0.5	1.26
Madera suave	0.5	0.4	0.052
Madera dura	0.7	0.4	0.094
R. fenólicas	1.5	0.3	0.2
R. epóxicas	1.6 – 2.1	0.3	0.1 – 0.8
Polietileno	0.96	0.37	0.28
Acrílico	1.19	0.35	0.108
Policarbonato	1.2	0.30	0.112
Grafito	1.5	0.20	87
Vidrio	2.5	0.20	0.59
Cuarzo	2.8	0.20	4 - 8
Aluminio	2.7	0.23	90
Acero	7.8	0.10	27
Cobre	8.8	0.092	227

Nota. La tabla muestra un resumen de propiedades térmicas de algunos materiales, entre ellos el acrílico. Fuente: (PLASTIGLAS, 2020)

Las láminas de acrílico de uso general, también conocido como acrílico extruido o por su nombre técnico “polímero termoplástico de metacrilato de metilo”, tienen mayor disponibilidad en el mercado respecto a las demás opciones, por esto, se sugiere el uso de este material para el proceso de termoformado. Se puede observar algunas láminas del material, en distintos espesores y colores en la Figura 3.

Figura 3

Láminas de PMMA¹

**Lámina acrílica de uso general**

Es un polímero termoplástico de metacrilato de metilo, mismo que posee una estructura molecular de tipo lineal y amorfo. Comúnmente utilizado en procesos de termoformado debido a su peso ligero, resistencia a algunos de los químicos usados en la industria y resistencia al desgaste.

Debido a su capacidad para suavizarse y moldearse cuando se expone al calor, el polímero termoplástico de metacrilato de metilo (PMMA) es adecuado para aplicaciones de termoformado, donde se puede transformar en una amplia variedad de formas y tamaños. Su claridad óptica, durabilidad y capacidad para mantener detalles finos después del proceso lo hacen valioso en la fabricación de piezas termoformadas, como paneles de visualización y envases (Karaman & Torun, 2020).

En la Tabla 4 podemos apreciar las características que posee este material para láminas de 3mm de espesor.

¹ Polímero termoplástico de metacrilato de metilo

Tabla 4*Propiedades mecánicas y térmicas de la lámina acrílica de uso general*

Propiedad	Método ASTM	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Mecánicas					
Resistencia a la tensión	D638-64T				
Ruptura		Kg/cm ²	700-760	PSI	10000 - 11000
Módulo de elasticidad		Kg/cm ²	28000 - 30000	PSI	400000 - 425000
Elongación a la ruptura		%	4.5	%	4.5
Resistencia a la flexión	D790-63				
Ruptura		Kg/cm ²	1050 - 1125	PSI	15000 - 16000
Módulo de elasticidad		Kg/cm ²	28000	PSI	400000
Resistencia a la compresión	D780-63T	Kg/cm ²	1260	PSI	18000
Resistencia a esfuerzo cortante	D732-46	Kg/cm ²	630 - 700	PSI	9000 – 10000
Resistencia al impacto	D256-56				
Charpy		Kg/m	0.48	ft/lbs.	35
Izod		Kg-cm/cm	3x10 ⁴	ft. lbs. /in.	0.4 – 0,5
Dureza (Rockwell)	D785-62		M100		M100
Térmicas					
Temperatura de formado		°C	140 – 180	°F	280 – 360
Coef. expansión	D696-44	cm/cm/°C	9x10 ⁵	in/in/°F	4x10 ⁵
Temp. Máx. de servicio.		°C	80	°F	176
Conductividad térmica		cal/seg.cm. °C	5x10 ⁴	BTU/hr. ft°F	14
Flamabilidad	D-635	cm/min.	3	in/min	1.2
Calor específico		cal/gr°C	0.35		0.35

Nota. Esta tabla reúne características técnicas, mecánicas y térmicas de las láminas de polímero termoplástico de metacrilato de metilo. Los valores han sido obtenidos en láminas de 3mm de espesor. Fuente: (PLASTIGLAS, 2020)

Matriz o molde

La matriz o molde en el termoformado es la pieza que se encarga de transferir su geometría externa hacia la lámina de polímero previamente calentada y en estado ahulado². Además, los moldes desempeñan un papel esencial en el proceso de termoformado al definir la forma y detalles de las piezas. Estos moldes, típicamente fabricados en acero o aluminio, aunque también pueden ser elaborados en otros materiales como corian, resina o MDF, deben ser diseñados con precisión para garantizar la reproducción exacta de la geometría deseada. También pueden incorporar características como sistemas o ductos de enfriamiento que además sirven para la aplicación de vacío (Kazmer, 2008).

La elección del material depende del número de bajadas o usos que se espera realizar con la matriz, además se debe tomar en cuenta la complejidad geométrica y su facilidad de manufactura (FABRINCO, 2014).

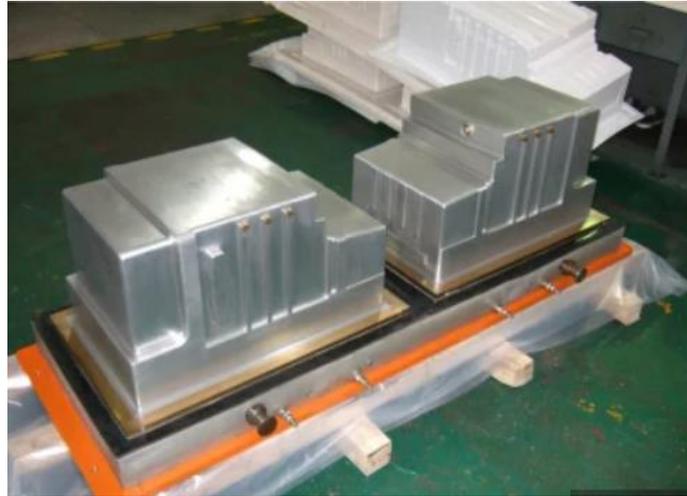
Los moldes, en el caso de termoformado al vacío, suelen tener pequeños orificios que permiten la aplicación de la presión negativa, el diámetro máximo debe ser de 0.5mm para no comprometer el acabado superficial.

En la Figura 4 se muestra dos moldes de aluminio usados en la construcción de cubiertas internas de congeladores.

² Deformación que puede alcanzar un material termoplástico por acción de la fuerza de gravedad, al ser sometido a un aumento de temperatura.

Figura 4

Molde para termoformado de cubiertas internas de congeladores.



Los moldes deben cumplir una serie de criterios que deben ser considerados para mejorar o asegurar la separación del molde con la lámina termoformada, la calidad de la superficie y la uniformidad del espesor del producto final, entre los más importantes tenemos:

- Ángulo de desmolde
- Tipo de matriz
- Estiramiento del termoplástico
- Altura o profundidad de la matriz

En el proyecto actual, el molde será suministrado por el cliente, razón por la cual, la fabricación del mismo no es de nuestra competencia y no amerita el detalle minucioso del tema.

Elementos calefactores

En el proceso de termoformado, los componentes calefactores juegan un papel esencial al suministrar la energía térmica necesaria para ablandar y moldear las láminas de materiales termoplásticos. Estos componentes, que comúnmente son resistencias eléctricas o radiadores de infrarrojos, posibilitan alcanzar la temperatura óptima requerida para llevar a cabo el procedimiento. Asegurar una distribución y regulación adecuadas de la temperatura en toda la

superficie de la lámina resulta fundamental para garantizar un calentamiento uniforme y prevenir imperfecciones en las piezas resultantes del proceso de termoformado (Brydson, 2017).

La lámina del termoplástico debe ser calentada, de tal manera que supere la temperatura de transición vítrea, sin embargo, no deberá igualar su temperatura de fundido. (Bejarano Arévalo, 2003)

Las resistencias eléctricas, habitualmente constituidas por alambres de aleaciones resistivas, generan calor al circular la corriente eléctrica a través de ellas. Su capacidad para proporcionar un calentamiento rápido y controlado las convierte en una opción versátil. Por otro lado, los radiadores de infrarrojos funcionan emitiendo radiación electromagnética de onda larga, que es absorbida por la superficie de las láminas termoplásticas, generando calor en el proceso. Estos radiadores permiten un calentamiento uniforme y pueden ajustarse para adaptarse a diferentes materiales y grosores de lámina.

La elección entre resistencias eléctricas y radiadores de infrarrojos depende de diversos factores, como el tipo de material termoplástico, el tamaño y la forma de las piezas a termoformar, así como la velocidad del proceso (Lazarezcu & Iovan, 2017).

En la Figura 5 se pueden apreciar algunas resistencias eléctricas también conocidas como niquelinas y en la Figura 6 se muestran radiadores de infrarrojos en funcionamiento.

Figura 5

Resistencias eléctricas de uso industrial



Nota. La imagen muestra algunas resistencias eléctricas de uso industrial, incluso algunas son parte de electrodomésticos como hornos o secadoras. Fuente: <https://web.masinteresantes.com/resistencias-electricas-industriales/>

Figura 6

Radiadores infrarrojos en funcionamiento.



Nota. La imagen muestra 3 conjuntos de radiadores de infrarrojos en funcionamiento, calentando una pieza automotriz. Fuente: <https://dagvandebeurt.nl/product/Persia264888>

Aplicaciones del termoformado

El proceso de termoformado se destaca por su versatilidad y encuentra una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias. Por ejemplo, en la fabricación de envases, el termoformado se emplea para producir recipientes de plástico para alimentos, cosméticos y productos farmacéuticos debido a su capacidad para crear formas personalizadas y herméticas (Brydson, 2017). En la industria automotriz, se utiliza para fabricar componentes como paneles de interiores y revestimientos, aprovechando su capacidad para crear superficies texturizadas y detalles precisos (Osswald & Menges, 2008). Además, en el ámbito médico, se emplea en la creación de dispositivos médicos y equipo de laboratorio, aprovechando su facilidad de desinfección y moldeado de alta precisión (Singh & Zweben, 2002)

En la fabricación de productos de consumo, el termoformado se aplica en la creación de bandejas, envases y blíster para productos electrónicos, juguetes y productos de cuidado personal, gracias a su capacidad para mostrar los productos de manera atractiva y protegerlos (Kazmer, 2008). Además, la industria de la publicidad utiliza el proceso para crear rótulos, exhibidores y paneles promocionales, aprovechando su capacidad de producir formas creativas y resistentes a la intemperie (Brydson, 2017). En resumen, el proceso de termoformado se extiende a través de diversas aplicaciones industriales, ofreciendo una solución eficiente y versátil para la fabricación de una amplia variedad de productos. Podemos observar algunos ejemplos de los productos obtenidos por medio del termoformado en la Figura 7.

Figura 7

Aplicaciones del termoformado



Nota. La figura muestra 4 aplicaciones principales del proceso de termoformado como rotulación, envasado de alimentos, blíster para fármacos y empaquetado de elementos electrónicos.

Capítulo 3

Diseño mecatrónico

Este capítulo muestra un análisis de las necesidades del cliente, haciendo uso de la función de calidad o matriz QFD se busca optimizar la solución que se va a dar para cada una de las funciones que tiene la máquina termoformadora. De igual manera se llevará a cabo los cálculos necesarios para el diseño y el sistema de control.

Despliegue de la función de calidad QFD

Esta sección tiene como objetivo priorizar las necesidades indicadas por el cliente, transformarlas en especificaciones técnicas para finalmente diseñar, construir y entregar una termoformadora que cumpla con las expectativas del cliente.

Requerimientos de calidad en términos de cliente

La etapa inicial de análisis consta de la descripción de las necesidades y/o requerimientos del cliente mediante la ponderación de la importancia de cada parámetro, esto en una escala del 1 al 5, siendo 1 la de menor importancia y 5 la de mayor importancia.

En la Tabla 5, se pueden apreciar los requerimientos y la ponderación de cada uno de ellos.

Tabla 5

Requerimientos en términos del cliente

Número	Requerimiento	Importancia
1	Tamaño aproximado de la máquina 1.50 m x 0.80 m x 0.80 m.	5
2	Temperatura máxima de 200 °C para calentamiento de láminas.	5
3	La máquina alcanza la temperatura deseada en un tiempo menor a 10 minutos.	3
4	Capacidad para láminas de acrílico de 2, 3 y 4 mm de espesor.	4

Número	Requerimiento	Importancia
5	Las láminas a termoformar pueden variar entre 0.35 m y 0.40 m de lado y deben ser de forma cuadrada.	4
6	Accionamiento automático de bomba de vacío.	1
7	Posicionamiento manual de la placa precalentada	4
8	Economizar al máximo el presupuesto	5

Nota. La tabla muestra los requerimientos solicitados por el cliente y la ponderación de la importancia de cada uno.

Actividades y parámetros del proceso

En esta sección se busca relacionar los requerimientos con las actividades o parámetros de la termoformadora, así como la asignación de unidades para medir cada uno de ellos, esto se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6

Parámetros de la termoformadora, importancia y unidades.

Número	Número de requerimiento	Actividad o parámetro	Importancia	Unidad
1	1, 2, 5, 7, 8	Dimensiones	5	cm
2	1	Masa total	2	Kg
3	4, 5	Espesor máximo de lámina de acrílico	4	mm
4	3, 4, 5	Tamaño y forma de láminas de acrílico	4	cm
5	2, 3	Máxima temperatura interna	4	°C
6	1, 2, 3	Tiempo de estabilización de temperatura	4	min
7	6, 8	Extracción de aire de la bomba de vacío	3	l/min

Nota. La tabla muestra la relación entre los parámetros de la máquina y el número de requerimiento de la Tabla 5, así como las unidades de medida y la importancia de los parámetros.

Matriz QFD

En esta sección, se realiza un análisis que busca mostrar las relaciones existentes entre los requerimientos del cliente y los parámetros o actividades que debe cumplir la termoformadora.

Haciendo uso de tres tipos de relaciones y su ponderación numérica de la siguiente forma:

- Relación fuerte, representada por un círculo lleno y con un valor numérico de 9.
- Relación media, representada por un círculo vacío y con un valor numérico de 3.
- Relación débil, representada por un triángulo y un valor numérico de 1.

En la Tabla 7, se muestra la matriz QFD y se obtiene la importancia técnica absoluta, la importancia técnica relativa, es decir porcentual y la prioridad de cada parámetro o actividad que debe cumplir la máquina termoformadora.

Tabla 7

Matriz QFD de la máquina termoformadora.

		Importancia según cliente	Dimensiones	Masa total	Espesor máximo de material acrílico	Tamaño y forma de placas de acrílico	Máxima temperatura interna	Tiempo de establecimiento de temperatura	Extracción de aire con bomba de vacío
Requerimientos del cliente	Tamaño máximo de 1.50 x 0.8 x 0.8 m	5	●	●				○	
	Alcanzar 200°C para el calentamiento de láminas	5	△				●	●	
	Alcanzar la temperatura en un 10 minutos o menos	3				○	○	●	
	Capacidad de trabajar con láminas de 2, 3 y 4 mm	4			●	○			
	Trabajar con láminas cuadradas de 35 a 40 cm	4	●		○	●			
	Accionamiento automático de bomba de vacío	1							●
	Posicionamiento manual de la placa pre calentada	4	△						
	Economizar el precio final	5	●						△
Importancia técnica absoluta			135	45	48	57	54	87	14
Importancia técnica relativa			29	9	12	15	12	21	10
Prioridad			1	6	5	3	4	2	7

Nota. En la tabla se obtiene la importancia técnica absoluta de los parámetros multiplicando el valor numérico de la relación por el valor numérico de la importancia de cada requerimiento y sumando el resultado de cada relación existente. Luego se escalan los resultados de tal manera que se muestran en forma de porcentaje, obteniendo la importancia técnica relativa. De esa manera obtenemos la prioridad de cada parámetro, siendo el 1 el más importante y el 7 el menos importante.

Definición de características

Haciendo uso de la información recopilada en el apartado anterior, los datos proporcionados por el cliente desde su experiencia y la información obtenida mediante el marco teórico de este documento, se detalla las características técnicas iniciales que la máquina termoformadora deberá cumplir. Estas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Características iniciales de la máquina

Característica	Valor	Unidad
Alto de la máquina	150	cm
Ancho de la máquina	70	cm
Profundidad de la máquina	70	cm
Temperatura mínima interna	25	°C
Temperatura máxima interna	200	°C
Espesor de placa de material base	2 – 3 – 4	mm
Voltaje de funcionamiento	110	V[AC]
Accionamiento del sistema de vacío	Por pedal	

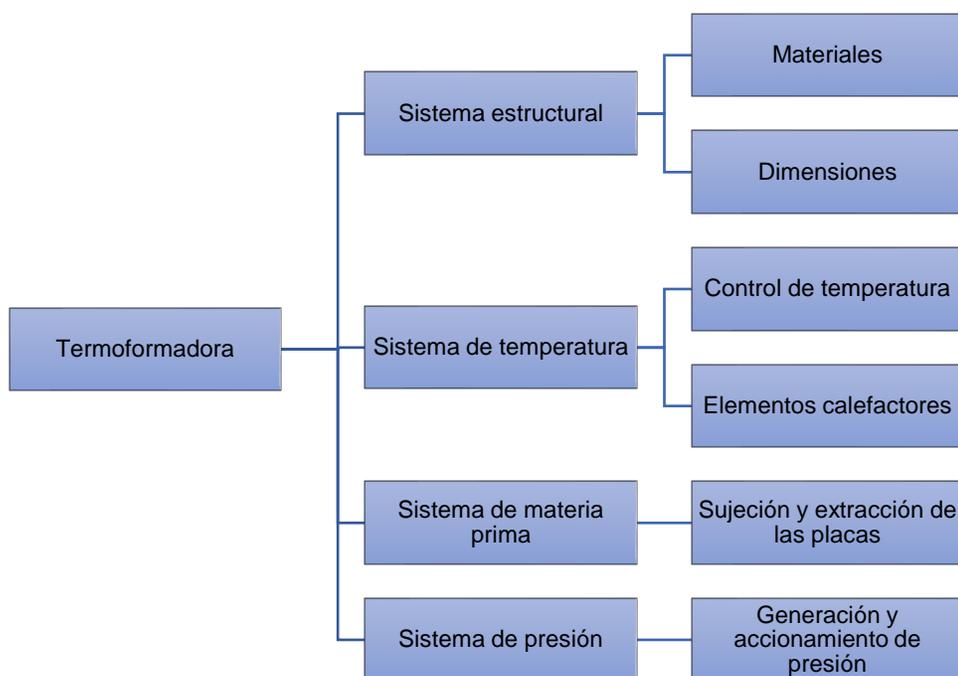
Nota. La temperatura mínima interna de la máquina hace referencia a la temperatura ambiente del espacio de trabajo, siendo el valor de 25°C una referencia.

Definición de arquitectura

Como se detalla en el marco teórico de este documento, una máquina termoformadora está compuesta del material base, el horno, el molde y el elemento de aplicación de presión. De esta manera se puede separar en subsistemas tanto el diseño como la construcción de la máquina, adoptando una arquitectura modular como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Arquitectura modular de la máquina termoformadora



Cada subsistema o submódulo debe cumplir una o varias funciones que contribuyen a alcanzar los parámetros de la máquina, los requerimientos del cliente y por ende los objetivos específicos del proyecto. Dichas funciones se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9

Funciones de los submódulos de la máquina termoformadora

Módulo	Submódulo	Funciones
Estructura	Material	Soportar el peso de la máquina y la temperatura generada durante el proceso.
	Dimensiones	Permitir el manejo de placas de acrílico de las dimensiones solicitadas.
Temperatura	Elementos calefactores	Generar el incremento de temperatura para el proceso de termoformado.

Módulo	Submódulo	Funciones
	Sensor de temperatura	Medir la temperatura antes, durante y después del proceso.
	Controlador	Realizar los cálculos necesarios para controlar el incremento de temperatura a fin obtener el valor requerido en el tiempo indicado.
Materia prima	Sujeción	Sujetar las planchas de acrílico en el proceso de termoformado
	Extracción	Permitir desplazar las planchas de acrílico ya calentadas hacia la torre de succión o vacío.
Presión	Generación y accionamiento	Generar presión negativa y aplicarla para obtener la geometría del molde.

Desarrollo de conceptos

Una vez establecidos los parámetros que debe cumplir la máquina, se plantea opciones para solventar las funciones de cada módulo y submódulo. En esta sección se muestra las características de las opciones planteadas y en la siguiente sección se elige la opción más adecuada mediante un análisis técnico que se apoya en el uso de matrices de Hales.

Módulo de estructura

Material

Las opciones planteadas para el material de la estructura son el acero estructural negro y los perfiles de aluminio. En la Tabla 10 se muestran las características de interés de estos materiales.

Tabla 10*Características de las opciones del material*

Característica	Tubo negro estructural	Tubo perfil de aluminio
Peso por unidad de 6m (Kg)	6 – 8	2 – 3
Precio (USD)	5 – 10	13 – 17
Temperatura de fusión (°C)	>1000	660 aprox.
Método de soldadura	SMAW	TIG

Dimensiones

El dimensionamiento de la máquina no requiere varias opciones en cuanto al tamaño físico, lo primordial es que el manejo de las planchas de acrílico pueda realizarse cómodamente, además es importante no sobredimensionar el tamaño, puesto que esto afecta en el tiempo requerido para alcanzar la temperatura necesaria en el proceso de termoformado.

Se recomienda una holgura de diez centímetros a cada lado del material y su sistema de sujeción. Por lo tanto, al requerir el uso de láminas de acrílico de máximo 40 cm de lado, se puede determinar el ancho y profundidad mínimo de la máquina, mismo que serían 60 cm, a esto se debe añadir el espesor de las paredes que aislarán el calor generado en el proceso, por lo cual se establece provisionalmente un ancho y profundidad de 70 cm, siendo estas las medidas externas.

En cuanto a la altura de la máquina, es necesario adecuarla de forma que el manejo de las placas de acrílico sea cómodo, se establece una altura estándar de 1.50 m, medida en la cual se puede acceder fácilmente al interior de la máquina termoformadora para extraer el material precalentado.

Módulo de temperatura

Elementos calefactores

Como se menciona en el marco teórico, los principales elementos calefactores usados en el proceso de termoformado, son las resistencias eléctricas y los radiadores de infrarrojos. Sin embargo, cabe mencionar que existen otros métodos para calentar las placas de material base, por ejemplo, calentamiento por flama y calentamiento por inmersión en fluido.

En la Tabla 11, se puede apreciar las ventajas y desventajas de cada opción planteada para calentar las planchas de acrílico.

Tabla 11

Ventajas y desventajas de los métodos para calentar el material

Método	Ventajas	Desventajas
Resistencias eléctricas (niquelinas)	Menor precio de implementación. Menor tamaño requerido para implementación. Menor tiempo requerido para aumentar su temperatura.	Alto consumo de energía. Distribución focalizada de la temperatura
Radiadores de infrarrojos	Distribución uniforme de la temperatura.	Precio elevado Mayor tamaño para obtener la misma temperatura. Mayor tiempo requerido para calentar.
Inmersión en fluido	Distribución uniforme de la temperatura. Menor tiempo requerido para calentar el material.	Mayor tamaño para implementación. Mayor precio para implementación.

Sensor de temperatura

Se plantean dos opciones para la selección del sensor de temperatura, en base a los elementos disponibles en la empresa.

Primero, una termocupla tipo K y su módulo MAX6675, el sensor arroja un pequeño voltaje proporcional al cambio de temperatura, mismo que necesita ser amplificado para su lectura mediante un controlador. La amplificación y acondicionamiento de la señal es realizada por el módulo. A pesar de que la termocupla es capaz de medir temperaturas de hasta 1300°C, su módulo trabaja de manera eficiente en el rango de 0°C a 200°C.

Por otro lado, tenemos un sensor PT100 y su módulo MAX31865, el sensor provee una salida de tipo resistencia ante el cambio de temperatura, y es el módulo el que se encarga de convertir la resistencia en una señal que pueda ser leída mediante el controlador. El rango de medición del PT100 es variable dependiendo de su fabricante y la cubierta del sensor, generalmente se encuentra entre -50°C y 850°C, sin embargo, el módulo puede trabajar con medidas de hasta 250°C.

En la Figura 9, se puede observar la termocupla tipo K y su módulo, así como en la Figura 10, se puede apreciar el sensor PT100 junto con su módulo.

Figura 9

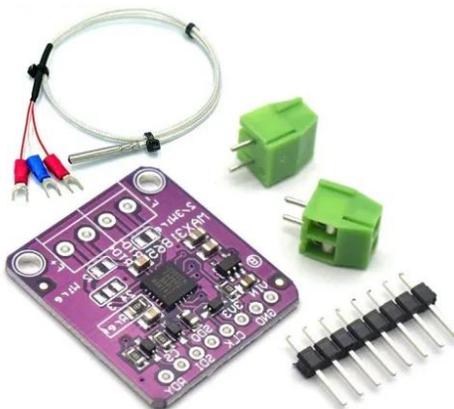
Termocupla K y módulo MAX6675



Nota. La imagen muestra una termocupla tipo K con recubrimiento metálico y en el centro su módulo MAX6675 con borneras. Fuente: <https://avelectronics.cc/producto/termocupla-tipo-k-modulo-max6675/>

Figura 10

PT100 y módulo MAX 31865



Nota. La imagen muestra un sensor PT100 de 3 hilos en la parte superior, abajo su módulo MAX31865 en color morado. Fuente: <https://www.lazada.sg/products/max31865-rtd-platinum-resistance-temperature-detector-module-pt100-to-pt1000-i2755007032.html>

La Tabla 12, muestra las principales características de ambos sensores y sus módulos.

Tabla 12

Comparación termocupla tipo K - MAX6675 vs PT100 - MAX31865

Característica	Termocupla tipo K y MAX6678	PT100 y MAX31865
Rango de medición del sensor (°C)	-200 a 1300	-50 a 850
Resolución (°C)	0.25	0.5
Tamaño (mm)	25x15x13	28x25x3
Precio (USD)	15 aprox.	18 aprox.

Característica	Termocupla tipo K y MAX6678	PT100 y MAX31865
Rango de medición del módulo (°C)	0 a 200	0 a 250
Comunicación del módulo	SPI	SPI

Controlador

En el mercado existen diversos controladores que se adaptan para los requerimientos de este proyecto, sin embargo, se hace mención a las opciones disponibles en la empresa, primero una tarjeta de desarrollo ESP32 y segundo un microcontrolador ATMEGA328P.

La Figura 11, muestra la tarjeta de desarrollo ESP32 modelo WROOM32 y la Figura 12, muestra el microcontrolador ATMEGA 328P.

Figura 11

Tarjeta de desarrollo ESP32



Figura 12*Microcontrolador ATMEGA328P*

La Tabla 13, muestra una comparativa entre las principales características de estos dispositivos, información que sirve para elegir la mejor opción en la siguiente sección.

Tabla 13*Características de ESP32 y ATMEGA 328P*

Característica	ESP32	ATMEGA328P
Procesador (bits)	32	8
Velocidad del procesador (MHz)	240	20
Memoria ROM (KB)	448	32
Memoria RAM(KB)	520	2
Entradas/salidas	16	23
Canales ADC/PWM	16	6
Nivel lógico (V)	3.3	5
Precio (USD)	15	5
Comunicación UART	Si	Si
Comunicación SPI	Si	Si
Comunicación I2C	Si	Si

Módulo de materia prima

El módulo de manejo de materia prima, incluye el dispositivo de sujeción para las placas de 2, 3 o 4 mm, así como la movilización de la misma hacia la torre de succión luego de la etapa de calentamiento.

Sujeción de las planchas

Se plantea dos opciones para la sujeción de las planchas, el primero, ubicar la plancha de acrílico entre dos placas de acero que se encuentren unidas por pinzas metálicas de sujeción, por otro lado, se plantea mantener unidas las planchas de acero y acrílico mediante pernos y tuercas mariposa.

En la Figura 13, se puede apreciar las pinzas metálicas de sujeción, así como en la Figura 14, se puede apreciar las tuercas tipo mariposa. Además, en la Tabla 14 se realiza un resumen de ventajas y desventajas de incluir cada una en el módulo.

Figura 13

Pinzas metálicas de sujeción



Nota. Tomado de: <https://www.piher.com/es/pinzas/96-pinza-metalica-multiusos.html>

Figura 14*Tornillo y tuerca mariposa*

Nota. Tomado de: <https://listado.mercadolibre.com.mx/tornillos-con-tuercas-mariposa>

Tabla 14

Ventajas y desventajas de las opciones de sujeción del material.

Elemento	Ventajas	Desventajas
Pinzas de sujeción	Posicionamiento más rápido y más sencillo	Gran tamaño Propenso a soltarse si se topa con las paredes del horno. Mayor precio.
Pernos y tuerca mariposa	Tamaño mínimo Se mantiene fijo Menor precio.	Posicionamiento requiere mayor tiempo

Módulo de aplicación de vacío

El módulo de aplicación de vacío incluye la torre de succión y el actuador que genera presión negativa, además se debe definir el tipo de accionamiento a usarse para el encendido del actuador.

Bomba de vacío

Se plantea dos opciones que se ajustan a los requerimientos del proyecto, la primera, una bomba de vacío Quality modelo QVP-600-2V y la segunda de marca Everwell modelo 1LVP-5MP, ambas se pueden apreciar en la Figura 15 y Figura 16.

Además, se muestra una comparativa de las principales características de las dos opciones, que se puede observar en la Tabla 15.

Figura 15

Bomba de vacío Quality QVP6002V



Nota. Tomado de: <https://www.beirutetienda.com/producto/bomba-de-vacio-5-5-cfm-quality/>

Figura 16*Bomba de vacío Everwell 1LVP-5MP*

Nota. Tomado de: <https://everwellparts.com/product/2-stage-vacuum-pump/>

Tabla 15*Características técnicas de las bombas de vacío*

Característica	Quality QVP6002V	Everwell 1LVP-5MP
Voltaje de funcionamiento (V)	110 – 220	115 – 220
Frecuencia (Hz)	50 – 60	50 – 60
Desplazamiento de aire (CFM ³)	4.8 – 5.5	5
Velocidad de trabajo (RPM)	2800 – 3400	3440
Vacío máximo generado (Pa)	2	2
Precio (USD)	200	210
Tamaño (mm)	348x138x245	456x182x278

Accionamiento

³ CFM: pies cúbicos por minuto.

Inicialmente se planteó dos tipos de accionamiento para el elemento generador de presión negativa, manual y automático. Al requerir que el posicionamiento de la lámina de acrílico sobre el molde sea manual, se descarta la posibilidad de usar un accionamiento de tipo automático. Dentro de los elementos que pueden accionar la bomba de vacío planteamos la opción de usar un pulsador en el tablero de control, o un interruptor tipo pedal en la torre de succión. A continuación, se muestra una comparativa de ventajas y desventajas de estas opciones en la Tabla 16.

Tabla 16

Ventajas y desventajas de las opciones de accionamiento de la bomba de vacío

Elemento	Ventajas	Desventajas
Pulsador en tablero de control	Menor tamaño.	Ubicado en tablero de control Se requiere el uso de los dedos de la mano.
Interruptor tipo pedal en la torre de succión	Ubicado en la torre de succión. Accionamiento con el pie.	Mayor tamaño

Selección de conceptos

En esta sección se elige la opción más adecuada para cada sistema y subsistema mostrado en el desarrollo de conceptos. Mediante el uso de matrices de Hales se calcula el porcentaje de importancia de las características. Luego, dichos valores se usan para ponderar las opciones en una matriz de selección, cuyo resultado arroja el valor numérico más alto a la mejor opción.

En la matriz de Hales se realiza una comparación entre todas las características, asignando los siguientes valores numéricos en la tabla:

- 5 si la característica en análisis es más importante que la característica con la que se compara.
- 2.5 si la característica en análisis es igual de importante que la característica con la que se compara.
- 0 si la característica en análisis es menos importante que la característica con la que se compara.

Se suman los valores obtenidos de manera horizontal y se añade una unidad, posteriormente se calcula el porcentaje de dicho valor respecto al total. De esta manera cada característica obtiene un porcentaje de importancia.

Una vez obtenido el porcentaje de importancia, se incluye dichos valores en la matriz de selección, donde también se encuentran las opciones a comparar. De igual manera se asigna valores numéricos en la tabla, así:

- 5 a la mejor opción y 1 a la peor opción referente a la característica.
- 3 a ambas opciones si la característica es similar o igual.

Se realiza el producto entre el valor asignado y el porcentaje de importancia de cada característica, se suman los valores obtenidos y la opción con el resultado de mayor valor numérico, es la mejor opción.

Módulo de estructura

Material

Tabla 17*Importancia de parámetros del material estructural*

	Resistencia al calor	Precio	Peso	Facilidad de manufactura	Precio de manufactura	Σ +1	Porcentaje	
Resistencia al calor	-	2,5	5	2,5	2,5	13,5	25%	
Precio	2,5	-	5	5	5	18,5	34%	
Peso	0	0	-	0	0	1	2%	
Facilidad de manufactura	2,5	0	5	-	2,5	11	20%	
Precio de manufactura	2,5	0	5	2,5	-	11	20%	
						TOTAL	55	100%

En la Tabla 17. se identifica que los parámetros más importantes en la selección del material, son el precio, la resistencia al calor y la facilidad y costo de manufactura.

Tabla 18*Matriz de selección del material estructural*

Parámetro de selección	Porcentaje	Acero estructural		Aluminio	
		Valor	Total	Valor	Total
Resistencia al calor	25%	1	0,25	5	1,23
Precio	34%	5	1,68	1	0,34
Peso	2%	1	0,02	5	0,09
Facilidad de manufactura	20%	3	0,60	3	0,60
Precio de manufactura	20%	5	1,00	1	0,20
		Total	3,55	Total	2,45

Por lo mostrado en la Tabla 18, se concluye que la mejor opción para la selección del material es el acero estructural por su menor precio, mayor resistencia al calor y facilidad de manufactura.

Módulo de temperatura

Elementos calefactores

Tabla 19

Importancia de parámetros de los elementos calefactores

	Consumo de energía	Velocidad de calentamiento	Tamaño	Precio	Eficiencia en transferencia	$\Sigma+1$	Porcentaje
Consumo de energía	-	0	2,5	0	0	3,5	6%
Velocidad de calentamiento	5	-	5	0	5	16	29%
Tamaño	2,5	0	-	0	5	8,5	15%
Precio	5	5	5	-	5	21	38%
Eficiencia en transferencia	5	0	0	0	-	6	11%
					TOTAL	55	100%

En la Tabla 19, se identifica que los parámetros más importantes en la selección de los elementos calefactores, son el precio, la velocidad de calentamiento y el tamaño.

Tabla 20*Matriz de selección de elementos calefactores*

Parámetro de selección	Porcentaje	Niquelina		Inmersión en fluido	
		Valor	Total	Valor	Total
Consumo de energía	6%	5	0,32	1	0,06
Velocidad de calentamiento	29%	1	0,29	5	1,45
Tamaño	15%	5	0,77	1	0,15
Precio	38%	5	1,91	1	0,38
Eficiencia en transferencia	11%	1	0,11	5	0,55
		Total	3,4	Total	2,6

Por lo mostrado en la Tabla 20, se concluye que la mejor opción para la selección de los elementos calefactores es el uso de niquelinas por su menor precio de implementación y menor tamaño requerido en la estructura.

Sensor de temperatura

Tabla 21*Importancia de parámetros del sensor de temperatura*

	Rango de medición	Resolución	Tamaño	Precio	Temperatura de trabajo	$\Sigma+1$	Porcentaje
Rango de medición	-	5	5	0	2,5	13,5	25%
Resolución	0	-	5	0	2,5	8,5	15%
Tamaño	0	0	-	2,5	2,5	6	11%
Precio	5	5	2,5	-	5	18,5	34%

	Rango de medición	Resolución	Tamaño	Precio	Temperatura de trabajo	$\Sigma+1$	Porcentaje
Temperatura de trabajo	2,5	2,5	2,5	0	-	8,5	15%
					TOTAL	55	100%

En la Tabla 21, se muestra que los parámetros más importantes para la selección del sensor de temperatura son el precio, el rango de medición y la temperatura de trabajo.

Tabla 22

Matriz de selección del sensor de temperatura

Parámetro de selección	Porcentaje	Termocupla K - MAX 6675		PT100-MAX31865	
		Valor	Total	Valor	Total
Rango de medición	25%	1	0,25	5	1,23
Resolución	15%	5	0,77	1	0,15
Tamaño	11%	3	0,33	3	0,33
Precio	34%	3	1,01	3	1,01
Temperatura de trabajo	15%	1	0,15	5	0,77
		Total	2,51	Total	3,49

Como resultado de la Tabla 22, se concluye que el uso del sensor PT100 y el módulo MAX 31865 es la mejor opción para medir la temperatura, debido a su bajo costo y su rango de medición que se adapta al intervalo de temperatura manejado en la termoformadora.

Controlador

Tabla 23*Importancia de parámetros del controlador*

	Tamaño	Precio	Conectividad inalámbrica	Velocidad	Consumo de energía	$\Sigma+1$	Porcentaje
Tamaño	-	2,5	5	0	2,5	11	20%
Precio	2,5	-	5	0	5	13,5	25%
Conectividad inalámbrica	0	0	-	2,5	2,5	6	11%
Velocidad	5	5	2,5	-	0	13,5	25%
Consumo de energía	2,5	0	2,5	5	-	11	20%
					TOTAL	55	100%

En la Tabla 23, se muestra que los parámetros más importantes en la selección del controlador del sistema son el precio y la velocidad de procesamiento, por otro lado, el tamaño y el consumo de energía tienen el mismo porcentaje de importancia, 20%.

Tabla 24*Matriz de selección del controlador*

Parámetro de selección	Porcentaje	ESP-32		ATMEGA 328P	
		Valor	Total	Valor	Total
Tamaño	20%	1	0,20	5	1,00
Precio	25%	1	0,25	5	1,23
Conectividad inalámbrica	11%	5	0,55	1	0,11
Velocidad	25%	5	1,23	1	0,25
Consumo de energía	20%	1	0,20	5	1,00
		Total	2,42	Total	3,58

Se muestra en la Tabla 24 que la mejor opción para controlador del sistema es el ATMEGA 328P debido a su menor costo, tamaño y consumo de energía.

Módulo de materia prima

Sujeción de las planchas

Tabla 25

Importancia de parámetros del método de sujeción del material base

	Tamaño	Precio	Peso	Tiempo de posicionamiento	Facilidad de movimiento	$\Sigma+1$	Porcentaje
Tamaño	-	5	5	2,5	2,5	16	29%
Precio	0	-	5	5	0	11	20%
Peso	0	0	-	2,5	0	3,5	6%
Tiempo de posicionamiento	2,5	0	2,5	-	0	6	11%
Facilidad de movimiento	2,5	5	5	5	-	18,5	34%
					TOTAL	55	100%

La Tabla 25 muestra que el parámetro más importante en la selección del método de sujeción de las planchas de acrílico es la facilidad de movimiento, seguido del tamaño y el precio.

Tabla 26

Matriz de selección del método de sujeción del material base

Parámetro de selección	Porcentaje	Pinzas		Perno-tuerca mariposa	
		Valor	Total	Valor	Total
Tamaño	29%	1	0,29	5	1,45
Precio	20%	1	0,20	5	1,00

Parámetro de selección	Porcentaje	Pinzas		Perno-tuerca mariposa	
		Valor	Total	Valor	Total
Peso	6%	1	0,06	5	0,32
Tiempo de posicionamiento	11%	5	0,55	1	0,11
Facilidad de movimiento	34%	1	0,34	5	1,68
		Total	1,44	Total	4,56

En la Tabla 26 se determina que la mejor opción para sujetar el material base, es la utilización de pernos y tuercas mariposa, debido a su facilidad de movimiento, menor precio y menor tamaño.

Módulo de aplicación de vacío

Bomba de vacío

Tabla 27

Importancia de parámetros de la bomba de vacío

	Precio	Desplazamiento de aire	Capacidad máxima de vacío	Tamaño	Voltaje de trabajo	$\Sigma+1$	Porcentaje
Precio	-	2,5	2,5	5	5	16	29%
Desplazamiento de aire	2,5	-	2,5	5	5	16	29%
Capacidad máxima de vacío	2,5	2,5	-	5	2,5	13,5	25%
Tamaño	0	0	0	-	5	6	11%
Voltaje de trabajo	0	0	2,5	0	-	3,5	6%
					TOTAL	55	100%

En la Tabla 27, se determina que el parámetro más importante para la selección de la bomba de vacío, es el precio y el desplazamiento de aire. Seguido de la capacidad máxima de generación de vacío.

Tabla 28

Matriz de selección de la bomba de vacío

Parámetro de selección	Porcentaje	Quality QVP600 2V		Everwell 1LVP-5MP	
		Valor	Total	Valor	Total
Precio	29%	3	0,87	3	0,87
Desplazamiento de aire	29%	5	1,45	1	0,29
Capacidad máxima de vacío	25%	3	0,74	3	0,74
Tamaño	11%	5	0,55	1	0,11
Voltaje de trabajo	6%	3	0,19	3	0,19
		Total	3,8	Total	2,2

Mediante el resultado obtenido en la Tabla 28, se determina que la mejor opción como bomba de vacío es la correspondiente a la marca Quality modelo QVP600 2V, esto debido a su mayor desplazamiento de aire y su menor tamaño.

Diseño conceptual

Culminada la etapa de desarrollo y selección de conceptos, se plantea un diseño conceptual para la construcción de la máquina termoformadora, cuyas especificaciones se resumen en la Tabla 29.

Tabla 29*Características del diseño conceptual de la termoformadora*

Característica	Valor o tipo
Tamaño	150x70x70 cm
Material	Acero estructural
Elementos calefactores	Niquelinas
Sensor de temperatura	PT100 y MAX31865
Controlador	ATMEGA 328P
Sujeción de placas de acrílico	Pernos y tuercas mariposa
Bomba de vacío	Quality QVP600 2V
Accionamiento de bomba de vacío	Interruptor tipo pedal

La Figura 17, muestra el diseño conceptual de la estructura de la máquina termoformadora, mismo que se abre por la parte frontal para extraer las planchas de acrílico luego de ser calentadas. De igual manera, la Figura 18, muestra el diseño conceptual del tablero de control y visualización de temperatura.

Figura 17

Diseño conceptual de la estructura de la máquina termoformadora.

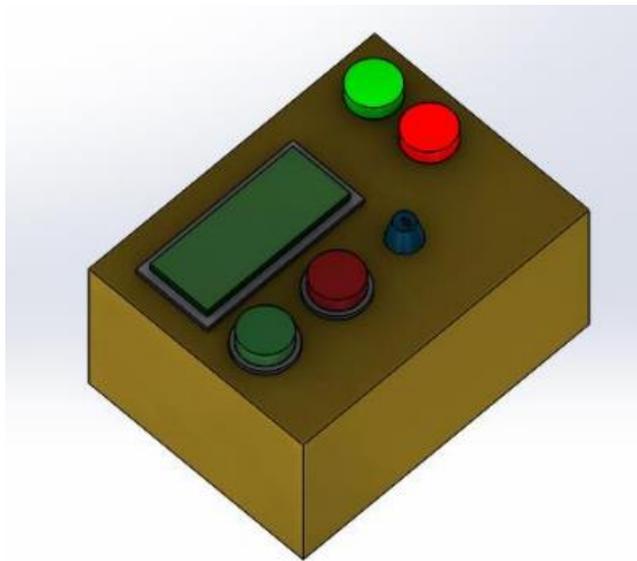


Nota. La figura muestra el diseño conceptual de la estructura principal para la termoformadora.

En la Figura 18, se identifica los componentes del tablero de control, una pantalla LCD para mostrar los valores de temperatura y tiempo, así como dos pulsadores, uno de marcha y otro de paro, adicional se encuentra una perilla que permita configurar el set point de temperatura y dos indicadores luminosos.

Figura 18

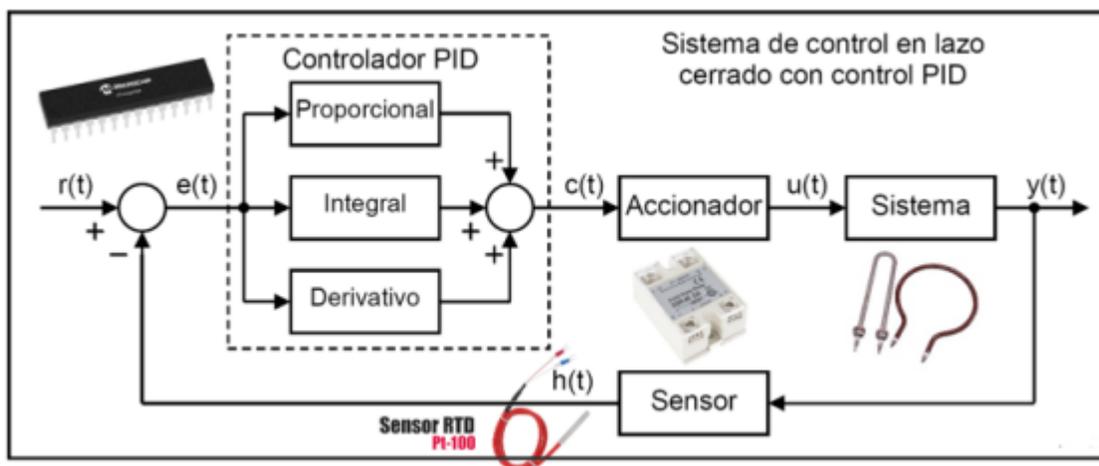
Diseño conceptual del tablero de control



El tablero de control es la interfaz de comunicación entre el operario y la máquina, además, contiene el controlador y la placa del sistema de temperatura, mismos que forman parte del sistema de control de lazo cerrado propuesto en la Figura 19.

Figura 19

Diseño conceptual del sistema de control de temperatura en lazo cerrado



Nota. La figura muestra los elementos del sistema de control propuesto, haciendo uso de los resultados de la selección de conceptos.

Análisis estático de elementos estructurales

Para el análisis estático de la estructura, se modela la misma mediante el uso de software CAD y se asigna el material, el resultado se muestra en la Figura 20. Posteriormente se asigna las restricciones de movimiento, las cargas y juntas soldadas. Finalmente se genera una malla que permite la división del elemento general en estructuras más pequeñas para el análisis mediante el software, el resultado de este proceso se muestra en la Figura 21.

Figura 20

Modelado de estructura

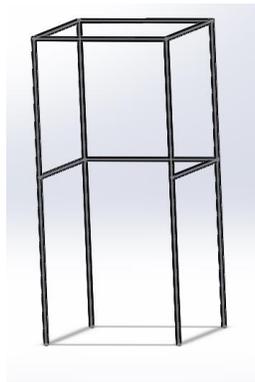
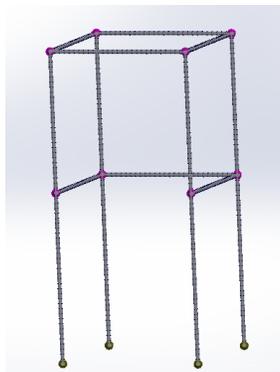


Figura 21

Mallado del modelo CAD



Al realizar el análisis de tensiones y desplazamientos, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 22 y en la Figura 23. Además, la Tabla 30 reúne los resultados mostrados para su análisis.

Figura 22

Análisis de tensiones de la estructura

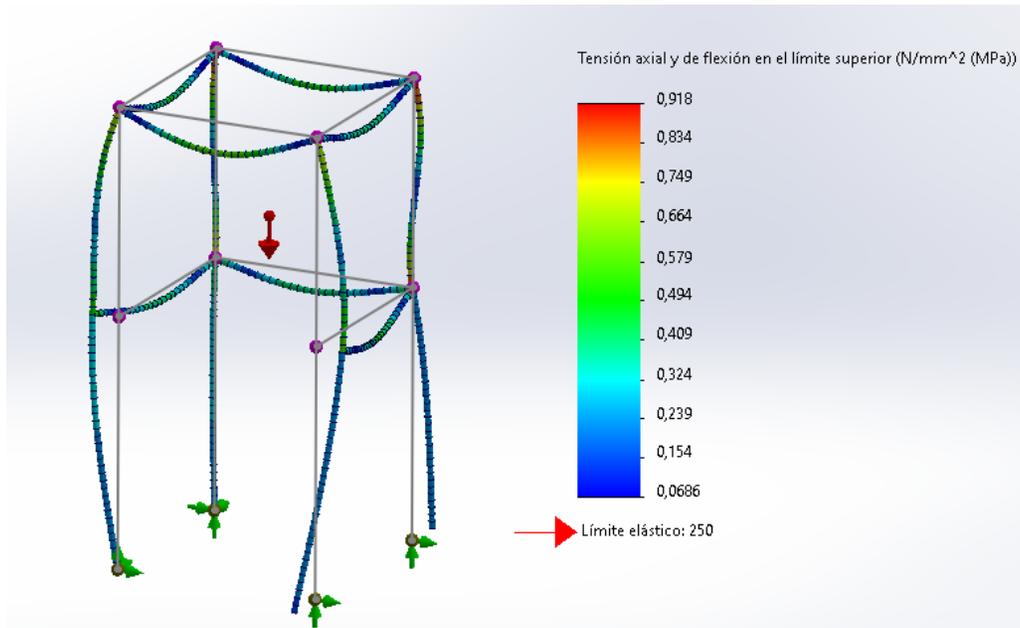
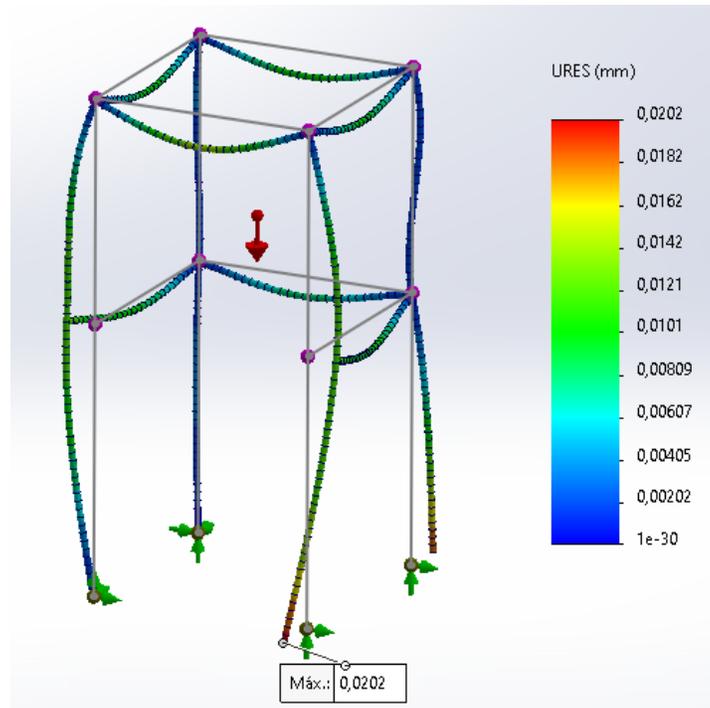


Figura 23

Análisis de desplazamiento en la estructura



Como resultado del análisis estático, se muestra que la tensión máxima asciende hasta 0.918 MPa, de igual manera el máximo desplazamiento por efecto del peso de los elementos estructurales, es de 0.02 mm.

Tabla 30

Resultados de análisis estático

	Mínimo	Máximo
Tensión (MPa)	0.068	0.918
Desplazamiento (mm)	0	0.02

Con los datos obtenidos se calcula el factor de seguridad:

$$n = \frac{\text{Límite elástico}}{\text{Máxima tensión}}$$

$$n = \frac{250 \text{ MPa}}{0.918 \text{ MPa}}$$

$$n = 272.3$$

De esta manera, se corrobora que la estructura es capaz de soportar su propio peso y el de las planchas de tol galvanizado.

Análisis térmico del sistema de temperatura

Cálculo de potencia de actuadores

En la selección de conceptos se determinó que los elementos calefactores deben ser resistencias eléctricas o niquelinas. En este apartado, se plantea los cálculos necesarios para obtener la corriente de trabajo que deben soportar los elementos que las controlan, en este caso, relés de estado sólido.

La longitud de cada niquelina es de 0.72 m y la resistencia por unidad de longitud es de 5.28 ohmios por cada metro. Con esta información se obtiene la resistencia de cada niquelina, así:

$$R = 0.72 \text{ m} * 5.28 \frac{\Omega}{\text{m}}$$

$$R = 3.80 \Omega$$

Al tratarse de una resistencia eléctrica, se toma en consideración la variación de resistencia por efecto de la temperatura. El comportamiento de esta variación responde a la siguiente fórmula:

$$R_f = R_o * [1 + \alpha(t_f - t_o)]$$

Donde:

- R_f : Resistencia final
- R_o : Resistencia inicial
- t_f : Temperatura final
- t_o : Temperatura inicial

- α : Coeficiente de temperatura de resistencia

El máximo incremento de temperatura se da cuando el horno llega a 200°C, la temperatura inicial es considerada a 25°C como temperatura ambiente. El coeficiente de temperatura para las niquelinas tiene un valor de 0.0002 °C⁻¹ (Jama & Tumbaco, 2020). Con estos valores se calcula la temperatura final a 200°C, así:

$$R_f = R_o * [1 + \alpha(t_f - t_o)]$$

$$R_f = 3.80 \Omega * [1 + 0.0002 \text{ °C}^{-1} * (200\text{°C} - 25\text{°C})]$$

$$R_f = 3.93 \Omega$$

Con el máximo valor de resistencia debido al incremento de temperatura, se calcula la corriente mínima.

$$V = I * R$$

$$I = \frac{110 [V]}{3.93 [\Omega]}$$

$$I_{min} = 27.98 [A]$$

De igual manera, se calcula la corriente máxima haciendo uso de la resistencia a temperatura ambiente.

$$I = \frac{110 [V]}{3.80 [\Omega]}$$

$$I_{max} = 28.95 [A]$$

Estos resultados, permiten dimensionar los conductores eléctricos del sistema de calentamiento, así como la elección de los relés de estado sólido. Se determina el uso de los relés de estado sólido marca Fotek modelo SSR-40DA, que se muestran en la Figura 24, según la hoja técnica del elemento, adjunta al final de este documento, es capaz de soportar una corriente de trabajo de hasta 40 amperios, un voltaje de entrada o control de hasta 32 Voltios DC y una carga que funcione entre 24 y 380 voltios AC.

Figura 24

Relé de estado sólido



La figura muestra el relé de estado sólido seleccionado para el proyecto, marca Fotek modelo SSR-30DA. Tomado de: <https://megatronica.cc/producto/rele-de-estado-solido-ssr-40d-40a/>

Con los datos de corriente máxima de trabajo y el voltaje de funcionamiento, se calcula la potencia de los actuadores, así:

$$P = V * I$$

Donde:

P: Potencia en Watts

V: Voltaje en Voltios

I: Corriente en Amperios

Al reemplazar la corriente calculada y el voltaje máximo de trabajo, se obtiene:

$$P = 110 [V] * 28.95[A]$$

$$P = 3184.5 [W]$$

Por lo tanto, la potencia de las niquelinas debe ser de 3184.5 vatios o superior.

Diseño del controlador de temperatura

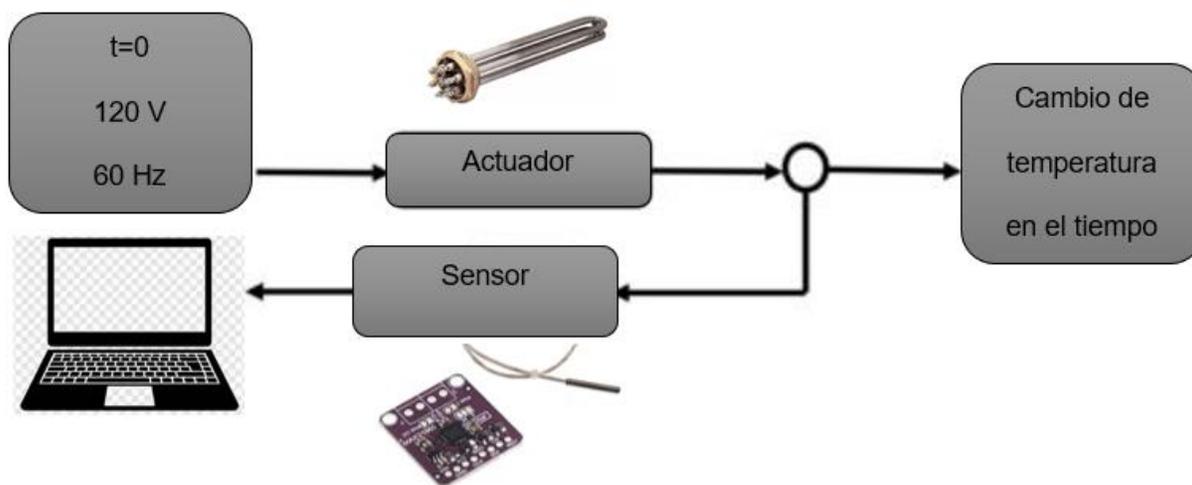
Control PID

La obtención de una función de transferencia en un sistema que involucra la temperatura es un proceso crucial para modelar su respuesta térmica. Para lograrlo, en primer lugar, se realizan experimentos en los que se aplican cambios de temperatura controlados al sistema, mientras se registran las respuestas a lo largo del tiempo. Estos datos son esenciales para establecer la relación entre las entradas y salidas del sistema en el dominio del tiempo.

Para la obtención de los datos de temperatura y tiempo, se implementa un sistema de lazo abierto, usando el sensor PT100, el módulo MAX31865 y las niquelinas como elementos calefactores, como se muestra en la Figura 25. Además, es necesario hacer uso del controlador del sistema para la obtención de datos y la comunicación con un computador.

Figura 25

Sistema de lazo abierto para obtención de función de transferencia



Nota. La figura muestra el sistema de lazo abierto para la obtención de los datos de temperatura vs tiempo.

La comunicación entre el sensor y el computador requiere la programación del controlador ATMEGA 328P, además mediante la misma se establece el envío de datos hacia una hoja de cálculo, la cual permite guardar y analizar los valores de temperatura y tiempos obtenidos.

A continuación, la Figura 26 muestra la primera parte de la programación utilizada para la obtención de los datos mencionados. En la misma se incluye las librerías necesarias para el funcionamiento del módulo MAX31865, se define los pines de comunicación SPI, los cuales son el 10, 11, 12 y 13 correspondientes a CS, DI, DO, CLK. Se establece los valores de resistencia de referencia conocida como RREF y de resistencia nominal conocida como RNOMINAL, cuyos valores son de 430 y 100 ohmios respectivamente. Dichos valores son elegidos acorde al sensor de temperatura, en este caso un PT100.

Luego se establece el valor cero a la variable flotante “temperatura” y se inicia la comunicación serial a 9600 baudios. Además, se define el uso del módulo MAX31865 y un sensor PT100 de 3 hilos. Se envía los comandos para limpiar los datos, establecer los encabezados como hora, segundos y temperatura, por último, se resetea el timer a cero.

Figura 26

Programa de comunicación con hoja de datos parte 1.

```

comunicacionExcel
1 #include <Adafruit_MAX31865.h>
2 // Use software SPI: CS, DI, DO, CLK
3 Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(10, 11, 12, 13);
4
5 // The value of the Rref resistor. Use 430.0 for PT100 and 4300.0 for PT1000
6 #define RREF      430.0
7 // The 'nominal' 0-degrees-C resistance of the sensor
8 // 100.0 for PT100, 1000.0 for PT1000
9 #define RNOMINAL  100.0
10
11 float Temperatura=0;
12
13 void setup() {
14     Serial.begin(9600);
15     //Serial.println("Adafruit MAX31865 PT100 Sensor Test!");
16     thermo.begin(MAX31865_3WIRE); // set to 2WIRE or 4WIRE as necessary
17     Serial.println("CLEARDATA");
18     Serial.println("LABEL, Hora, Segundos, Temperatura");
19     Serial.println("RESETTIMER");
20 }

```

Nota. La imagen muestra la primera parte del código de programación del sistema de lazo abierto para la obtención de datos de temperatura y tiempo del sistema.

Luego se declara el programa que se repite constantemente como se muestra en la Figura 27, se asigna el valor de medido por el sensor en la variable “Temperatura”, y se envía mediante comunicación serial junto con los datos correspondientes a fecha, hora y temporizador. Al final se añade un delay para obtener medidas cada 1000 milisegundos.

Figura 27

Programa de comunicación con hoja de datos parte 2.

```

21
22 void loop(){
23 ///////////////////////////////////////////////////
24   uint16_t rtd = thermo.readRTD();
25   //Serial.print("RTD value: "); Serial.println(rtd);
26   float ratio = rtd;
27   ratio /= 32768;
28   //Serial.print("Ratio = "); Serial.println(ratio,8);
29   //Serial.print("Resistance = "); Serial.println(RREF*ratio,8);
30   //Serial.print("Temperature = ");
31   Temperatura=thermo.temperature(RNOMINAL, RREF);
32
33 //int sensorValue = analogRead(A0);
34 Serial.print("DATA,TIME,TIMER,");
35 Serial.println(Temperatura);
36 delay(1000);
37 }

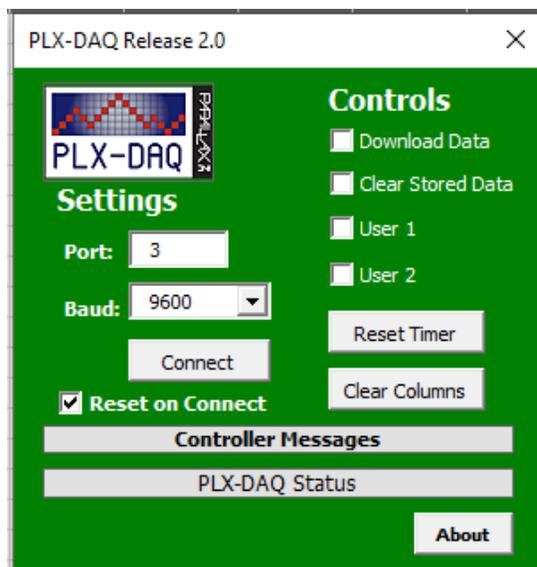
```

Nota. La imagen muestra la segunda parte del código de envío de datos mediante comunicación serial hacia la hoja de datos.

En la Figura 28, se muestra la interfaz del software libre PLX-DAQ, mismo que permite la comunicación serial entre la hoja de cálculo y el controlador que envía los datos. En la misma, se especifica el puerto de comunicación del controlador y la velocidad de la comunicación en baudios.

Figura 28

Interfaz de comunicación serial PLX-DAQ



Nota. La imagen muestra la interfaz de comunicación PLX-DAQ entre el controlador (conectado al puerto COM3) y la hoja de datos, a una velocidad de 9600 baudios.

Quando se establece la comunicación, el envío de datos hacia la tabla comienza. Tal como se indica en la Figura 29, la temperatura ambiente se mantiene estable en un valor de 25.13°C y en el segundo 48 se aplica el escalón a la entrada, es decir el voltaje alterno de la red eléctrica, acto seguido, la temperatura comienza a elevarse lentamente.

Figura 29*Interfaz de salida PLX-DAQ*

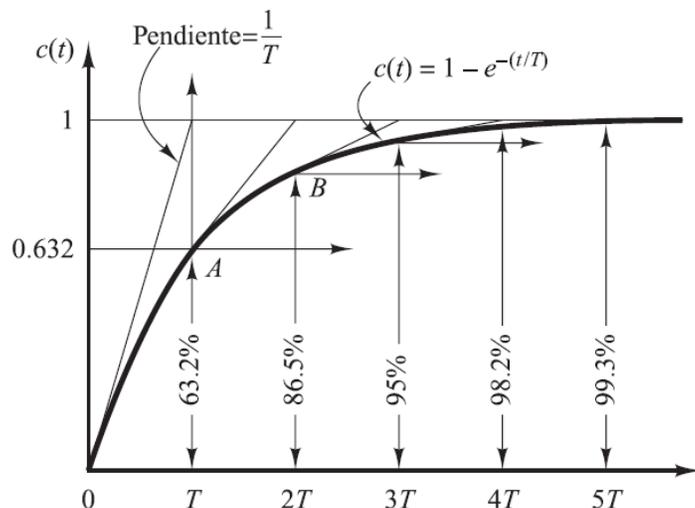
Hora	Segundos	Temperatura	Voltaje
18:11:19	39,8	25,13	0
18:11:20	40,9	25,13	0
18:11:21	42,1	25,13	0
18:11:22	43,2	25,13	0
18:11:23	44,4	25,16	0
18:11:24	45,5	25,13	0
18:11:25	46,7	25,16	0
18:11:27	47,9	25,19	107,5
18:11:28	49,0	25,19	107,5
18:11:29	50,2	25,16	107,5
18:11:30	51,3	25,16	107,5
18:11:31	52,5	25,19	107,5
18:11:32	53,6	25,19	107,5
18:11:34	54,8	25,23	107,5
18:11:35	55,9	25,23	107,5
18:11:36	57,1	25,26	107,5
18:11:37	58,3	25,26	107,5
18:11:38	59,4	25,26	107,5
18:11:39	60,6	25,29	107,5
18:11:40	61,7	25,33	107,5
18:11:42	63,0	25,33	107,5

Nota. La figura muestra una porción de los datos de salida, obtenidos mediante la comunicación serial entre el controlador y la hoja de datos.

Los sistemas que involucran transferencia de calor generalmente son sistemas de primer orden (Ogata, 2010), su respuesta ante un escalón unitario se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Respuesta de un sistema de primer orden ante un escalón unitario.



Nota. La figura muestra la respuesta obtenida por un sistema de primer orden ante una entrada tipo escalón unitario. Tomado de: (Ogata, 2010)

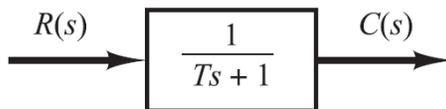
El sistema de primer orden se muestra simplificado mediante diagramas de bloques en la Figura 31, donde:

$R(s)$: Entrada

$C(s)$: Salida

Figura 31

Diagrama de bloques de un sistema de primer orden



La relación existente entre la entrada y salida del sistema en el dominio de la frecuencia puede describirse de la siguiente manera: Tomado de: (Ogata, 2010)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1}$$

Por lo tanto, la salida del sistema cuando la entrada es un escalón no unitario, se define como:

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} * \frac{K}{s}$$

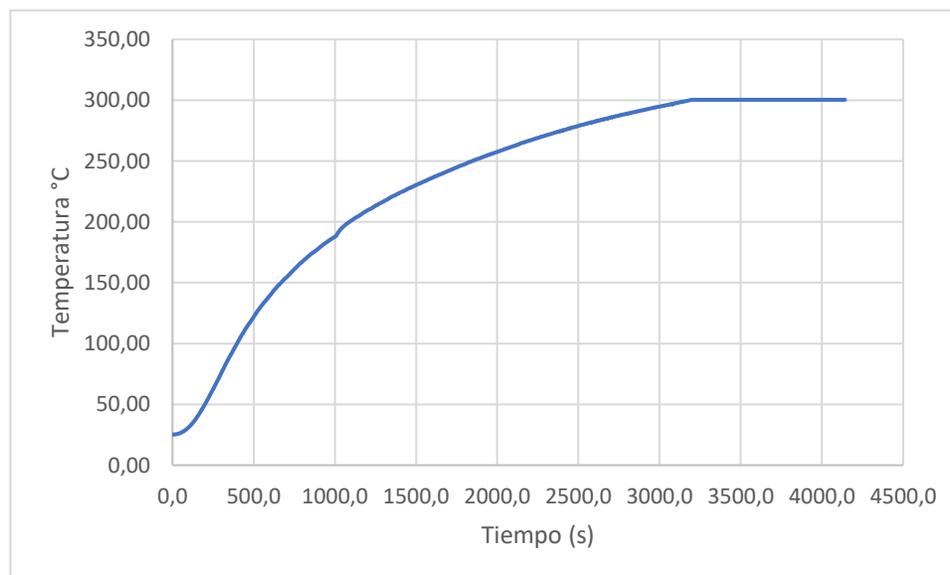
Aplicando la transformada inversa de Laplace, se obtiene la respuesta del sistema en el dominio del tiempo, así:

$$c(t) = K(1 - e^{-t/T})$$

Por lo cual se busca los valores de K y T para modelar el comportamiento del sistema. Con los datos obtenidos en el sistema de lazo abierto, se realiza la gráfica de la temperatura vs tiempo a partir de la aplicación del voltaje de funcionamiento de las niquelinas, esto se puede apreciar en la Figura 32.

Figura 32

Temperatura vs tiempo en lazo abierto



El valor de K, corresponde a la ganancia del sistema, el cual se obtiene con la diferencia del valor de estabilización de temperatura y el valor inicial. Así:

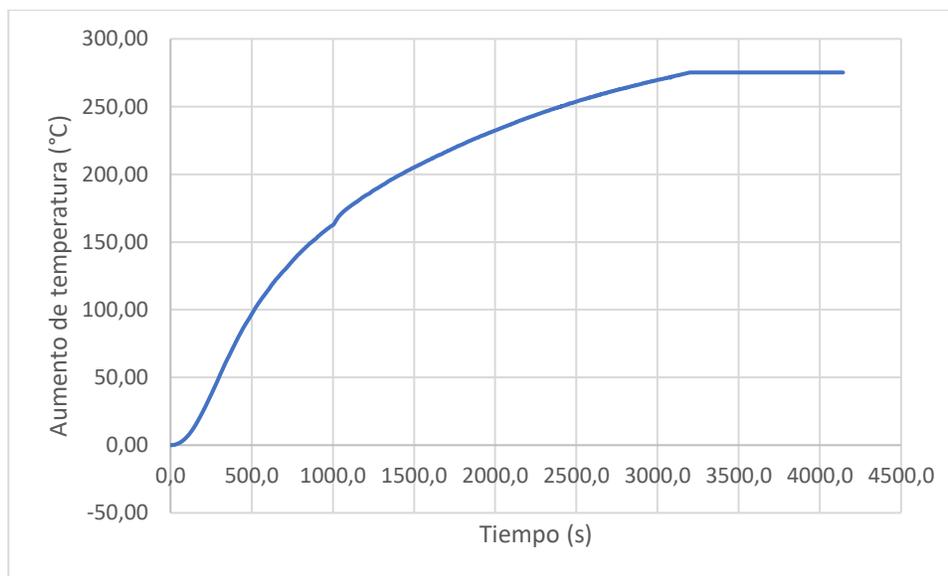
$$K = 300.4 - 25.19$$

$$K = 275.21$$

De igual manera, al establecer una ganancia de 275.21, la gráfica de los datos de incremento de temperatura vs tiempo, se puede apreciar en la Figura 33, al restar la referencia o temperatura ambiente.

Figura 33

Curva real de Aumento de temperatura vs tiempo



Según la Figura 30, cuando el tiempo t es igual a T , la salida alcanza un 63.2% del valor total de la respuesta ante el escalón. Por lo cual, se calcula el 63.2% de la ganancia:

$$0.632 * 275.21 = 173.93 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El valor T , es el valor de tiempo en el cual el sistema alcanza una temperatura de 173.93°C por encima del valor inicial.

$$173.93 + 25.19 = 199.12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este valor se busca en los datos del sistema de lazo abierto como se muestra en la Figura 34. Al no encontrar el valor exacto, se interpola los datos y se obtiene que el valor de T es 1079.93 segundos.

Figura 34

Extracto de datos temperatura vs tiempo en $t=T$.

1075,0	198,61	173,42
1076,1	198,71	173,52
1077,3	198,86	173,67
1078,4	198,96	173,77
1079,6	199,07	173,88
1080,8	199,25	174,06
1081,9	199,32	174,13
1083,1	199,39	174,20
1084,2	199,50	174,31
1085,4	199,64	174,45

Con los valores de K y T conocidos, se plantea la función que representa el comportamiento del sistema en el tiempo, así:

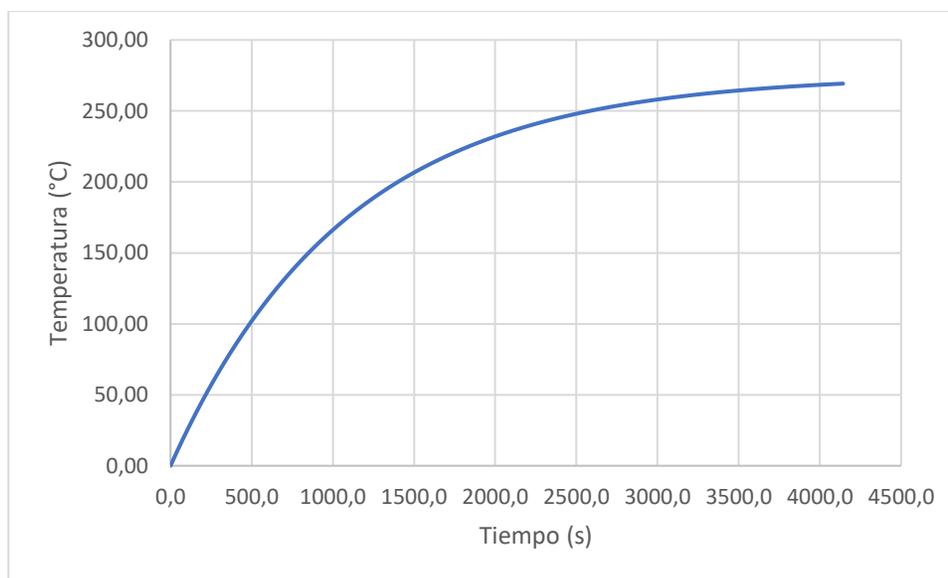
$$c(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

$$c(t) = 275.21 \left(1 - e^{-\frac{t}{1079.93}} \right)$$

Se realiza la gráfica en función del tiempo y se obtiene la Figura 35.

Figura 35

Curva modelada de temperatura vs tiempo.

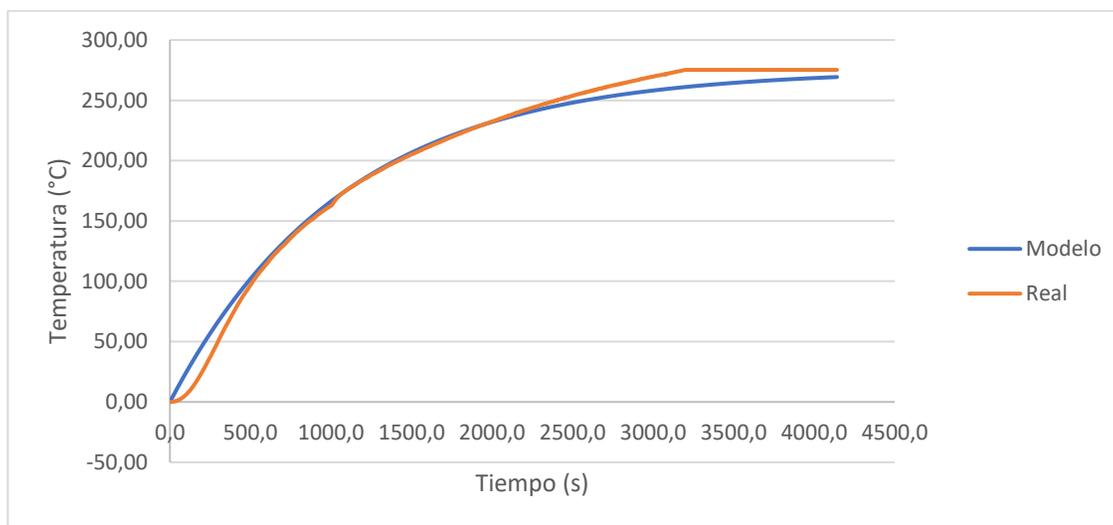


Nota. La figura muestra la temperatura vs tiempo del modelo aproximado mediante la función de transferencia y su traspaso al dominio del tiempo.

En la Figura 36, se puede observar la superposición de las curvas correspondientes a los datos reales y el modelo matemático aproximado.

Figura 36

Comparación de respuesta real vs modelado



Una vez realizada la comparación de las curvas real y modelada en el tiempo, se aplica la transformada de Laplace para obtener la función de transferencia del sistema. Con estos datos, se realiza la sintonización del controlador mediante software y se obtiene los resultados mostrados en la Tabla 31.

Tabla 31

Constantes del controlador.

Variables	Valor
Kp	4.844
Kd	0.006655
Ki	57.31

Nota. La tabla muestra los valores de K_p , K_d , K_i obtenidos mediante el método de sintonización en software. El código se encuentra anexo al final del documento.

Estos valores se aplican a la programación del controlador ATMEGA 328P en conjunto con el ingreso de señales de los pulsadores, sensor de temperatura y la salida PWM de control hacia los relés de estado sólido quienes a su vez manejan el comportamiento de las niquelinas. El programa completo se anexa al final del documento.

Capítulo 4

Construcción y evaluación

Proceso de construcción

Se inicia la elaboración de la estructura metálica que brindará el soporte necesario para los demás elementos que componen la termoformadora.

La estructura ocupa tubo negro cuadrado de 25 mm con un espesor de 1.5 mm para el esqueleto, la soldadura que permite unir las partes de la estructura se realizó con electrodos E6011. Las paredes laterales, frontal, posterior y superior se realizaron con tol galvanizado de 2 mm y lana de vidrio en el interior para contribuir al aislamiento térmico necesario.

En la Figura 37, se puede apreciar la estructura metálica de la máquina termoformadora.

Figura 37

Estructura metálica de la termoformadora



Posterior a la construcción de la estructura metálica, se implementa los elementos calefactores, es decir, las niquelinas, este proceso se puede apreciar en Figura 38.

Figura 38

Instalación de niquelinas.



Luego de instaladas las niquelinas en la estructura principal, se realiza el prototipo del controlador de temperatura, en este apartado se muestra tanto las placas de prueba como la placa final que después se implementa en el tablero de control de la termoformadora.

En la Figura 39, se muestra la placa de prueba en etapa de fabricación, así mismo, en la Figura 40, se aprecia la placa de prueba conectada a los elementos de mando, visualización, control del sistema de temperatura.

Figura 39

Construcción de PCB de prueba del sistema de control de temperatura

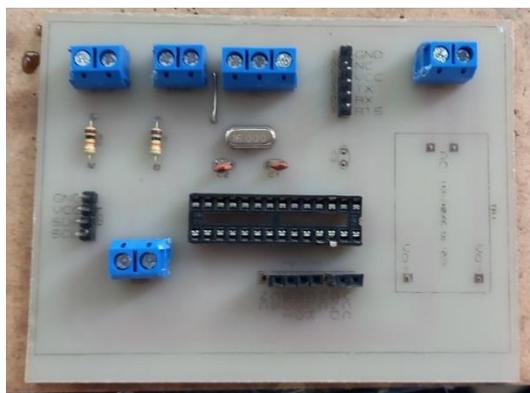
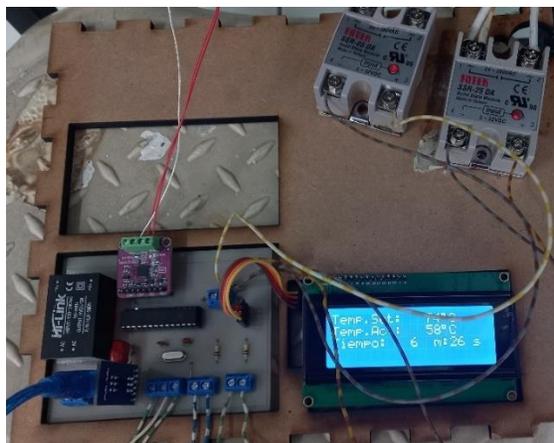


Figura 40

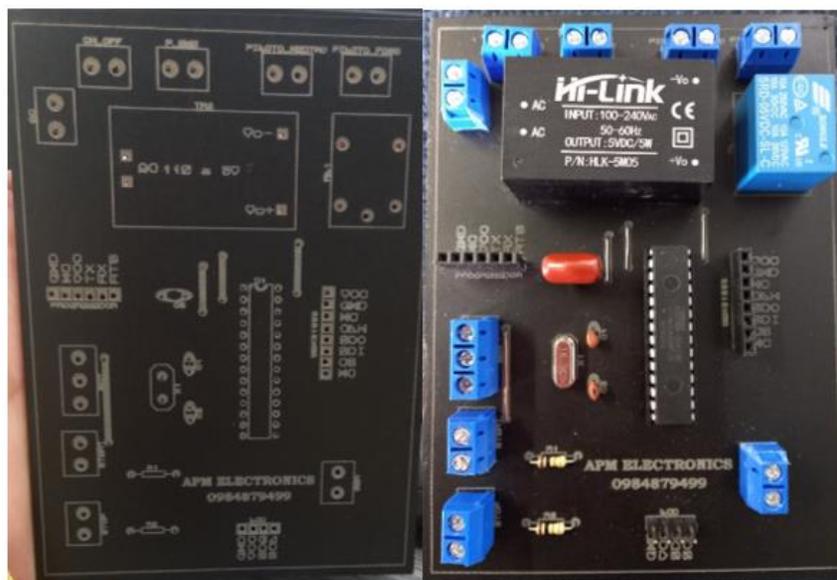
Conexión del sistema de temperatura con PCB de prueba.



Se realiza las pruebas necesarias con la placa provisional mostrada en la Figura 40, se corrige los errores y reubican los elementos necesarios en la placa, dando como resultado una placa final que se muestra en la Figura 41. Además, en la Figura 42, se aprecia el diseño de pistas del PCB final.

Figura 41

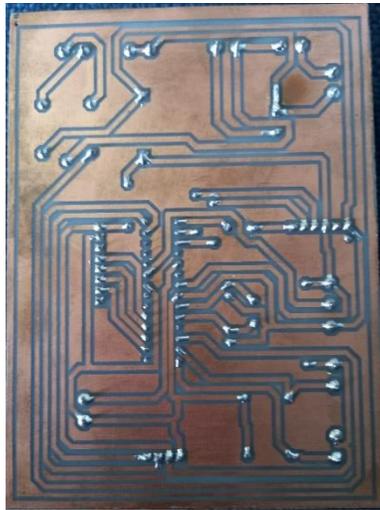
PCB del sistema de control.



Nota. La imagen muestra en la izquierda la PCB terminada sin elementos conectados, en la derecha se observa la placa finalizada con los elementos soldados.

Figura 42

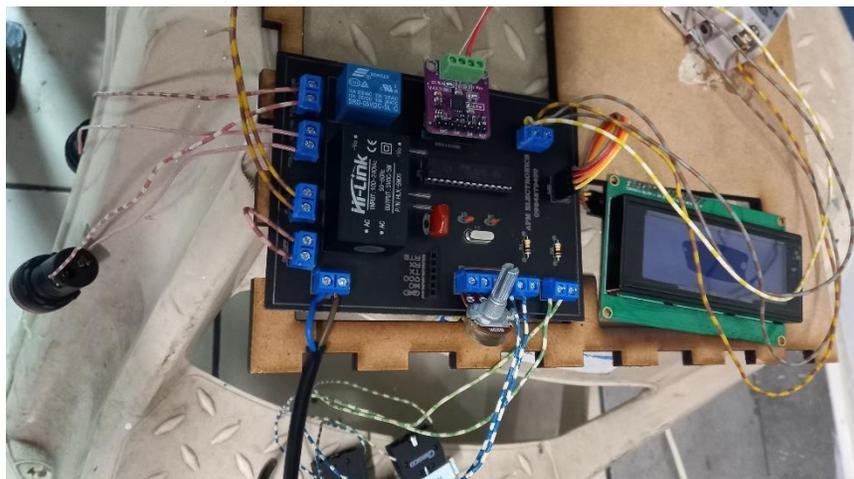
Diseño de pistas de PCB



Con la placa PCB finalizada, se realizan las pruebas de funcionamiento de la misma como se muestra en la Figura 43. Además, se inicia el proceso de construcción del tablero de control en la Figura 44 y el montaje de los elementos en la Figura 45.

Figura 43

Prueba de funcionamiento de PCB



Nota. La figura muestra la PCB terminada y la conexión de los elementos como pulsadores, indicadores luminosos, sensor de temperatura, pantalla LCD y actuadores.

Figura 44

Construcción del tablero de control



Figura 45

Montaje de elementos en tablero de control



El tablero de control contiene una pantalla LCD, un mando rotatorio, dos pulsadores normalmente abiertos, dos luces piloto, un interruptor principal y un pulsador de paro de

emergencia, internamente se encuentra la placa de control de temperatura y los relés de estado sólido. El tablero de control finalizado se puede apreciar en la Figura 46.

Figura 46

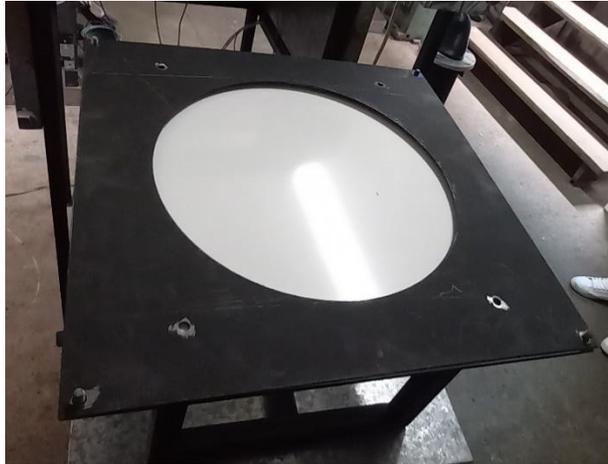
Tablero de control



Luego de finalizar la construcción de la estructura principal y el tablero de control, se construye el sistema de sujeción de las planchas de acrílico, se usa planchas metálicas de 1 mm de espesor y un agujero interno de 35 cm de diámetro para permitir el pandeo de material. Además, se usa el sistema de sujeción de pernos y tuercas mariposa como se muestra en la Figura 47.

Figura 47

Sistema de sujeción de planchas de acrílico



Una vez culminada la estructura principal, el tablero de control y sistema de sujeción de planchas, se construye la torre de succión y su conexión con la bomba de vacío y el pedal de accionamiento como se muestra en la Figura 48.

Figura 48

Torre de succión



En la Figura 49, se aprecia la termoformadora culminada, donde se muestra la implementación de una ventana de visualización en la tapa frontal a petición de la empresa.

Figura 49 *Termoformadora finalizada*



Análisis de funcionamiento

Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento realizadas en la termoformadora, inician desde la implementación de las niquelinas para la etapa de calentamiento. En dicha etapa se realiza las pruebas pertinentes para determinar si el tiempo y temperatura son adecuadas para el proceso y material de trabajo.

En la Figura 50, se muestra una prueba del sistema de control de temperatura con lámina de acrílico de 3 mm de espesor.

Figura 50

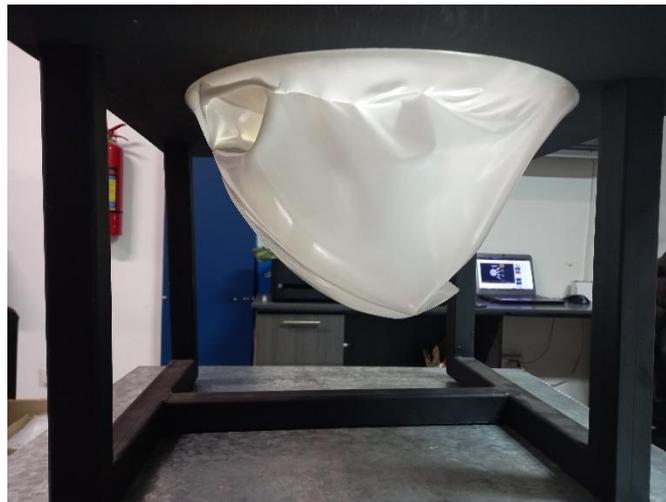
Prueba de calentamiento de material



Posterior a las pruebas de calentamiento, también se realiza pruebas de enfriamiento y contracción del material sin termoformar, únicamente con efecto del propio peso de la lámina de acrílico, como se muestra en la Figura 51.

Figura 51

Contracción del material



Una vez culminadas las pruebas necesarias, tanto del material como del sistema de control de temperatura, se realizan pruebas finales para la entrega de la máquina. El proceso de

posicionamiento de la placa se detalla en la Figura 52, luego se procede a configurar la temperatura deseada desde el tablero de control, hasta conseguir el estado ahulado del material, posteriormente se retira la plancha de acrílico y se coloca suavemente sobre el molde, donde se presiona hacia abajo mientras se acciona el pedal que activa la bomba de vacío, como indica la Figura 53. Luego se corta el excedente y se obtiene un producto final como se aprecia en la Figura 54.

Figura 52

Posicionamiento de las planchas de acrílico



Figura 53

Posicionamiento de la plancha sobre el molde

**Figura 54**

Molde termoformado

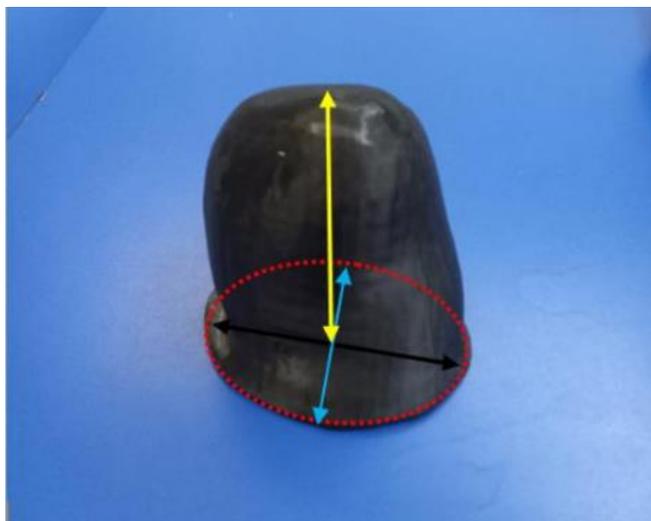


Análisis de medidas de los moldes termoformados

El molde original corresponde a una prótesis de hombro, misma que se desea replicar, para analizar el funcionamiento de la termoformadora se definen 3 medidas principales a comparar, el eje menor de la base, el eje mayor de la base y la altura, las cuales se muestran en la Figura 55.

Figura 55

Medidas características del molde original



Nota. La figura muestra las 3 medidas de control del molde original, en celeste el eje menor de la base, en negro el eje mayor de la base y en amarillo la altura.

La Tabla 32, muestra los valores de las medidas del molde original, las cuales sirven de referencia para el análisis de los productos terminados.

Tabla 32

Medidas de control del molde original

Medida	Valor	Unidad
Eje menor	82.4	mm
Eje mayor	103.7	mm
Altura	139.2	mm

En la Tabla 33 se presenta los resultados de diez pruebas realizadas en la máquina termoformadora. Estos datos se analizan para obtener el promedio y la desviación estándar de dichas medidas.

Tabla 33*Medidas de las pruebas realizadas*

	Dimensiones (mm)		
	Eje menor	Eje mayor	Altura
Prueba 1	81,8	103,9	140
Prueba 2	82,1	103,4	138,2
Prueba 3	82,9	104,4	139,9
Prueba 4	82,3	103,4	138,4
Prueba 5	82,4	103,7	140,1
Prueba 6	81,8	104,2	139,2
Prueba 7	82,1	103,6	138,3
Prueba 8	82,3	103,7	138,2
Prueba 9	82,5	104,1	139
Prueba 10	82,8	103,9	139,9

Nota. La tabla muestra una recopilación de dimensiones de pruebas realizadas en la termoformadora.

Se realiza una tabla con las medidas del eje menor para analizar los datos mediante estadística descriptiva. En la Tabla 34 se calcula la sumatoria de las diferencias respecto al promedio y el cuadrado de dicha medida.

Tabla 34*Análisis de medidas del eje menor*

	Eje menor		
	Xi	Xi-X	(Xi-X) ²
Prueba 1	81,8	-0,5	0,25
Prueba 2	82,1	-0,2	0,04
Prueba 3	82,9	0,6	0,36
Prueba 4	82,3	0	0
Prueba 5	82,4	0,1	0,01
Prueba 6	81,8	-0,5	0,25
Prueba 7	82,1	-0,2	0,04
Prueba 8	82,3	0	0
Prueba 9	82,5	0,2	0,04
Prueba 10	82,8	0,5	0,25
Total	823		1,24

Con los valores de la Tabla 34 se calcula la desviación estándar, varianza y coeficiente de variación de los datos, así como el rango de las medidas, los resultados se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35

Medidas de dispersión del eje menor

Indicador	Valor
Promedio	82,3
Varianza	0,12
Desviación Estándar	0,35
Rango	1,1
Coef. Variación	0,004

El proceso se repite con las medidas del eje mayor y la altura, cuyos resultados se resumen en la Tabla 36.

Tabla 36

Medidas de dispersión de las medidas de control del molde

	Eje menor	Eje mayor	Altura
Promedio	82,3	103,83	139,12
Varianza	0,12	0,10	0,59
Desviación estándar	0,35	0,32	0,77
Rango	1,1	1,0	1,9
Coef. Variación	0,004	0,003	0,006

Nota. La tabla muestra un resumen de las medidas de dispersión de las longitudes del eje menor, eje mayor y la altura de las pruebas realizadas.

En base a la información de la Tabla 36, se concluye que la desviación estándar de todas las medidas de control se mantiene por debajo de 0.77 mm. Además, se realiza el cálculo de errores relativos y absolutos de cada longitud con respecto al valor del molde original en la Tabla 37.

Tabla 37*Cálculo de errores de las medidas*

	Eje menor	Eje mayor	Altura
Promedio	82,30	103,83	139,12
Original	82,4	103,7	139,2
Error absoluto	0,10	0,13	0,08
Error relativo	0,12	0,13	0,06

Nota. La tabla muestra los valores promedio de las pruebas, el valor original del molde y los errores absoluto y relativo de dichas medidas.

Capítulo 5

Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

Conclusiones

La máquina termoformadora construida permite replicar moldes de prótesis de hombro con planchas de acrílico de 2, 3 y 4 mm de espesor.

La termoformadora es capaz de entregar un producto terminado en un tiempo menor a 20 minutos, lo cual representa una mejoría respecto al anterior sistema de fabricación de moldes usado por la empresa, el cual requería de un tiempo entre 17 a 19 horas.

El costo de producción de cada molde es menor en referencia al sistema anterior donde se requería 50 USD para la producción de cada uno. Con la máquina termoformadora el costo necesario para un molde es de 12 USD a 16 USD dependiendo el espesor de la lámina de acrílico.

El cálculo del error absoluto del promedio de la altura de los moldes obtenidos aparenta que es la medida de control que menos difiere respecto al molde original, sin embargo, al tener una desviación estándar de 0.77 (la mayor de las 3 medidas), se confirma que es la medida con mayor variación respecto al promedio, es decir es la longitud menos estable, esto puede estar relacionado al corte manual del excedente de material.

La extracción del molde de termoformado se dificulta debido a los ángulos de salida no considerados en el diseño del molde. Se recomendó el rediseño del molde con dichas consideraciones.

La máquina termoformadora cumple con los requerimientos funcionales solicitados y las características del modelo combinado que fue producto del diseño mecatrónico.

Los moldes de prótesis obtenidos difieren en menos de 1 mm con respecto a las medidas geométricas del molde original.

Recomendaciones

Se recomienda el uso de láminas de acrílico con certificado de calidad, el uso de láminas sin certificaciones produjo que el molde final se agriete debido a la poca uniformidad del espesor y la variación en la temperatura de deflexión.

Se recomienda el uso de un suministro estable de energía eléctrica, la variación del voltaje monofásico de la red afecta el tiempo necesario para alcanzar la temperatura deseada.

Se recomienda el uso de un suministro estable de energía eléctrica, la variación del voltaje monofásico de la red afecta la generación uniforme de vacío de la bomba.

Trabajos futuros

Diseño y construcción de un sistema automático para el posicionamiento de la plancha precalentada sobre la torre de succión.

Diseño y construcción de una nueva torre de succión para mejorar el posicionamiento de la plancha precalentada y facilitar el corte de excedente de material.

Diseñar e implementar un sistema IoT para registrar y acceder a datos de las variables de la máquina termoformadora.

Diseñar e implementar un sistema de visión por computadora con cámara térmica para analizar el enfriamiento de las placas sobre el molde.

Bibliografía

- Bejarano Arévalo, J. (2003). Termoformado del compuesto polietileno de alta densidad con refuerzo lignocelulosico. Termoformado del compuesto polietileno de alta densidad con refuerzo lignocelulosico. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Brydson, J. A. (2017). *Plastics Materials*. Butterworth-Heinemann.
- FABRINCO. (05 de 2014). *Contacto y contenido Fabrinco*. Recuperado el Diciembre de 2022, de FABRINCO: https://www.fabrinco.com/wp-content/uploads/2014/05/Tutorial_Fabrinco_Termoformado.pdf
- Jama, E., & Tumbaco, J. (2020). *Diseño de un sistema de sellado térmico al vacío para empacar la producción de manteca en Industrias Ales*. Guayaquil. Obtenido de www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/57214/1/T-113108%20%20Jama%20%20Tumbaco.pdf
- Kalpkjian, S., & Schmid, S. (2008). Termoformado. En S. Kalpkjian, & S. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (págs. 559-559). México: Pearson.
- Karaman, M. E., & Torun, S. A. (2020). Processing and Characterization of PMMA/Nano-Clay Nanocomposites by Thermoforming. *Polymers*.
- Kazmer, D. O. (2008). *Injection Mold Design Engineering*. Hanser Publishers.
- Lazarezcú, L., & Iovan, C. (2017). Thermoforming Machine and Technology Selection for Plastic Materials. *Procedia Manufacturing*, 437-444.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson.
- Osswald, T. A., & Menges, G. (2008). *Materials Science of Polymers for Engineers*. Hanser Publishers.
- PLASTIGLAS. (2020). *PLASTIGLAS MR*. Recuperado el noviembre de 2022, de <https://plastiglas.com.mx/literatura>

Singh, S., & Zweben, C. (2002). *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Prentice Hall.

Apéndices