

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Fabricación de una máquina de termoformado para el laboratorio
de procesamiento de plásticos”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Robert Boris Vaca Reyes

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2022

AGRADECIMIENTOS

A mi valiente padre, el ilustre caballero Sr. Robert Tyrone Vaca Baños y a mi aguerrida madre, la honorable dama Narcisa España Reyes Lucas; quienes de manera absoluta fueron mi mayor motivación para que esta etapa de mi vida sea posible; el sudor de ellos reflejado en este logro. Jamás tendré suficiente para agradecerles el arrojo y tesón de cada una de sus gotas de sudor para guiarme durante mi vida académica. Ellos fueron mi refugio y mi mejor atención psicológica. Esto es para ellos.

A mis hermanos; Tyrone, Rebeca, Isaac y Josué, quienes me motivaron en momentos claves, incluso a veces sin saber que lo hacían, pero justo era cuando más lo necesitaba.

A mi mejor amiga y confidente; mi novia, la Srta. Ing. María Fernanda Hernandez Paredes, quien supo estar conmigo incluso en mis momentos más oscuros, y me ayudó a resurgir casi desde las cenizas. A quien le he permitido conocerme tan bien y desnudarme el corazón, que sin duda alguna creo férreamente podrá seguir siendo la mejor compañera en mi camino de la vida, ahora como un Profesional; como un Ingeniero Mecánico de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

A mi amada ESPOL: Gracias por haberme acogido entre tus brazos sempiternos, llenos de justicia, tesón, sabiduría e inteligencia. Gracias por la oportunidad y el cobijo que me diste. Jamás te olvidaré.

DEDICATORIA

Al Dios que siempre fue mi refugio y consuelo en lo personal y en lo académico. Sin su magistral ayuda, el desarrollo y finalización de este trabajo habría sido imposible.

A los futuros estudiantes y profesionales de las distintas carreras de Ingeniería de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, cuya garra los ayudará a sacarle el mejor provecho en ciencia y tecnología a la máquina de termoformado, para fortalecer sus habilidades educacionales y profesionales.

Al Dr. Andrés Rigail Cedeño, quien a más de ser un referente de la educación y la ciencia de ESPOL y del país, se convirtió en un guía paso a paso para que este proyecto sea posible.

Y de manera muy especial a Jairon Triguero, técnico del LEMAT, quien estuvo pendiente del avance de la tesis tanto en la parte teórica como en su respectiva implementación. Dios le recompense en gran manera.

Al laboratorio de procesamiento de plásticos, al laboratorio de materiales, al laboratorio de soldadura, y a todos los profesores y técnicos docentes quienes me guiaron con sus consejos firmes y certeros.

Gracias. Este proyecto, también les pertenece.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución. Yo, Robert Boris Vaca Reyes doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.



Robert Boris Vaca Reyes



Firmado electrónicamente por:
ANDRES FRANCISCO
RIGAIL CEDENO

PhD. Andrés Rigail
DIRECTOR

EVALUADORES

Ángel Ramírez, PhD

PROFESOR DE LA MATERIA

Andrés Rigail, PhD

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este proyecto se enfoca en la construcción de una máquina de termoformado, la cual será parte de los equipos ya existentes en el laboratorio de procesamiento de plásticos de la FIMCP (Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción) de la ESPOL (Escuela Superior Politécnica del Litoral). Durante los años de historia del laboratorio, no se ha concretado la implementación de una máquina de termoformado para el mismo, sino que fue hasta 2017, donde surgió una tesis proponiendo el diseño de una máquina de termoformado para laboratorio, la cual fue realizada como proyecto de materia integradora por estudiantes de la FIMCP. De esto, se ha tomado el diseño teórico de la mencionada máquina para esta vez realizar su construcción.

El equipo, una vez listo podría ser adaptado no solo a clases de pregrado, sino que también a clases de diplomados, maestrías e incluso para prestar servicios de manera privada.

El termoformado es un proceso de transformación de termoplásticos en forma de lámina, a una forma definida por un molde. El proceso empieza con la selección apropiada del tipo de termoplástico, para una posterior adaptación al tamaño que acepte la máquina; luego, esta pasa por un proceso de calentamiento mediante resistencias eléctricas hasta alcanzar su temperatura de formado, y entonces juntar la lámina con el molde objetivo, extrayendo mediante succión por vacío el aire en exceso presente en entre lámina y molde. En este punto, la pieza ya estaría termoformada, lo que finalmente se tiene que hacer es enfriar la pieza, para que sea separada del molde. Tanto los procesos de colocación de la lámina, fijación de temperatura (según el termoplástico a usarse) y la extracción de la termoforma, se realizarían de manera manual. Los procesos intermedios, tales como la subida y bajada del marco que contiene a la lámina termoplástica y el sistema de de succión de vacío, se proponen que sean realizados de manera automática, por ello la máquina entraría en la categoría de "semiautomática". Y aunque en la industria ya existen máquinas completamente automáticas, lo que se pretende con esta es básicamente, enriquecer el conocimiento del estudiante mediante experimentaciones.

Aunque la máquina es capaz de trabajar con todos los termoplásticos existentes en la industria, el proyecto se enfoca en la aplicabilidad de ensayos mediante polietileno de

alta densidad (HDPE) y poliestireno de alto impacto (HIPS), luego; si el docente u operador desean o requiere realizar otros ensayos, con otros materiales; la máquina también podría adaptarse para materiales que demanden una temperatura de formado de hasta 600°C, siempre y cuando se respeten los límites de operabilidad y seguridad para evitar contratiempos o resultados no agradables.

El costo final del proyecto es de \$ 3781.01 USD, lo cual se determina a detalle en el capítulo 3.

Palabras clave: máquina de termoformado, termoplásticos, polietileno, poliestireno, laboratorio.

ABSTRACT

This project focuses on the construction of a thermoforming machine, which will be part of the existing equipment in the plastics processing laboratory of the FIMCP (Faculty of Engineering in Mechanics and Production Sciences) of the ESPOL (Higher School Polytechnic of the Coast). During the years of history of the laboratory, the implementation of a thermoforming machine for it has not materialized, but it was until 2017, where a thesis arose proposing the design of a thermoforming machine for the laboratory, which was carried out as a project of integrating subject by FIMCP students. From this, the theoretical design of the aforementioned machine has been taken for this time to carry out its construction.

The equipment, once ready, could be adapted not only to undergraduate classes, but also to graduate classes, master's degrees, and even to provide services privately.

Thermoforming is a process of transformation of thermoplastics in sheet form, to a shape defined by a mold. The process begins with the appropriate selection of the type of thermoplastic, for a subsequent adaptation to the size that the machine accepts; then, it goes through a heating process by means of electrical resistances until it reaches its forming temperature, and then join the sheet with the target mold, extracting by vacuum suction the excess air present between the sheet and the mold. At this point, the piece would already be thermoformed, what finally has to be done is to cool the piece, so that it is separated from the mold. Both the processes of placing the sheet, setting the temperature (depending on the thermoplastic to be used) and the extraction of the thermoform, would be carried out manually. The intermediate processes, such as the raising and lowering of the frame that contains the thermoplastic sheet and the vacuum suction system, are proposed to be carried out automatically, therefore the machine would enter the "semi-automatic" category. And although fully automatic machines already exist in the industry, what is intended with this is basically to enrich the student's knowledge through experimentation.

Although the machine is capable of working with all existing thermoplastics in the industry, the project focuses on the applicability of tests using high-density polyethylene (HDPE) and high-impact polystyrene (HIPS), then; if the teacher or operator wishes or requires to carry out other tests, with other materials; The machine could also be adapted for

materials that require a forming temperature of up to 600°C, as long as the operability and safety limits are respected to avoid setbacks or unpleasant results.

The final cost of the project is \$3781.01 USD, which is determined in detail in chapter 3.

Keywords: *thermoforming machine, thermoplastics, polyethylene, polystyrene, laboratory.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE GENERAL	V
ABREVIATURAS	VIII
SIMBOLOGÍA	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE PLANOS	XIV
CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Definición del problema	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Marco teórico.....	3
1.3.1 Polímeros	3
1.3.2 Normas y códigos	3
1.3.3 Gestión de proyecto.....	4
1.3.4 Consideraciones en los costos	4
1.3.5 Ética en Diseño	5
1.3.6 Efecto de la temperatura en los termoplásticos.....	6
1.3.7 Termoformado.....	7
1.3.8 Técnica de termoformado.....	7
1.3.9 Temperaturas importantes en el proceso de termoformado.....	8
1.3.10 Parámetros a evaluar en la máquina de termoformado	11
1.3.11 Temperatura en el proceso de calentamiento de las láminas	11
CAPÍTULO 2	13
2 METODOLOGÍA DEL DISEÑO	13
2.1 Requerimientos de diseño	13
2.2 Categorización de la lista de atributos	15
2.3 Criterios de diseño.....	16
2.4 Ponderación de criterios	16
2.5 Alternativas propuestas	19

2.6	Selección de alternativas	20
2.7	Esquema de metodología de diseño	24
2.8	Diseño conceptual	26
2.9	Láminas.....	27
2.10	Diseño del sistema de calentamiento	27
2.11	Potencia del sistema de resistencias	32
2.12	Diseño del sistema de vacío	32
2.13	Mecanismo de movimiento de la lámina.....	35
2.14	Estructura de la máquina.....	38
CAPÍTULO 3	.....	39
3 RESULTADOS	.....	39
3.1	Resultados del sistema de calentamiento.....	39
3.2	Resultados del sistema de vacío.....	40
3.2.1	Selección de la bomba de vacío.....	40
3.2.2	Selección del tanque acumulador de vacío.....	42
3.2.3	Descripción del sistema de vacío	43
3.3	Resultados del mecanismo del movimiento de la lámina.....	44
3.4	Análisis de costos	46
3.4.1	Costos directos.....	46
3.4.2	Costos indirectos.....	49
3.4.3	Costo total del proyecto	50
CAPÍTULO 4	.....	51
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	51
4.1	Conclusiones.....	51
4.2	Recomendaciones.....	52
BIBLIOGRAFÍA	.....	53
APÉNDICES	.....	55
Apéndice A: Planos	.....	56
Apéndice B: Catálogos	.....	67
Apéndice C: Práctica de laboratorio	.....	76
PRÁCTICA DE LABORATORIO	.....	77
1 Objetivos	.....	77
1.1	Objetivo General	77
1.2	Objetivos específicos	77
1.3	Introducción.....	77

2	Procedimiento	78
3	Resultados esperados	82
4	Preguntas de la práctica	86
5	Referencias	86

ABREVIATURAS

ASTM	American Society of Testing and Materials (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales)
CFM	Cubic Feet per Minute (Pie Cúbico por Minuto)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
HDPE	High Density Polyethylene (Poliétileno de Alta Densidad)
HIPS	High Impact Polystyrene (Poliestireno de Alto Densidad)
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
ISO	Organización Internacional de Normalización
IVA	Impuesto al Valor Agregado
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
PE	Poliétileno
PS	Poliestireno

SIMBOLOGÍA

Q_L	calor removido de la lámina para lograr el termoformado
V_L	volumen de la lámina
ρ_L	densidad del material de la lámina
C_{pL}	calor específico del material de la lámina
ΔT	diferencia entre la temperatura ambiente y la que se desea alcanzar para termoformar la lámina
T_b	temperatura de formado
T_a	temperatura ambiente
h_{if}	Calor latente de fusión del material de la lámina
m_L	masa en kg de la lámina
Δt	tiempo de exposición de la lámina a los calentadores
kJ	kilo joules
m	metro
m^2	metros cuadrados
m^3	metros cúbicos
kg	kilogramo
K	Kelvin
$^{\circ}C$	grados celsius
Q_{12}	Calor emitido desde las resistencias
A	área de la lámina
F	factor de visión
σ	constante de Stefan Boltzman

$T_{resistencias}^4$	temperatura de las resistencias eléctricas
$T_{formado}^4$	temperatura de formado de las láminas termoplásticas
S_p	capacidad de bombeo
t	tiempo
s	segundo
min	minuto
P_{atm}	presión atmosférica
$P_{termoformado}$	presión de termoformado o presión de vacío absoluta
V	volumen
L	largo
w	ancho
H	alto
D_{in}	diámetro interno
R_a	relación de áreas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Polímeros termoplásticos más comunes y sus temperaturas de deflexión al calor y su correspondiente temperatura de termoformado. Fuente: (Plastiglas, 2020).....	6
Figura 1.2. Esquema del principio básico de termoformado una vez posicionada la plancha. Fuente: Fabrinco	7
Figura 1.3. Esquema del principio básico de termoformado una vez aplicada la succión por vacío. Fuente: Fabrinco	7
Figura 1.4: Módulo de Young vs Elongación de los materiales. [Fuente: elaboración propia en ANSYS Granta 2019]	9
Figura 1.5: Materiales poliméricos. Se resaltan el poliestireno y el polietileno. [Fuente: elaboración propia en ANSYS Granta 2019]	9
Figura 2.1: Posible diseño final de la máquina de termoformado. [Fuente: (Krix, 2012)] ...	25
Figura 2.2: Diseño conceptual del proceso de termoformado. [Fuente: elaboración propia]	26
Figura 2.3: Dimensiones de la lámina termoplástica. [Fuente: elaboración propia]	27
Figura 2.4: Sistema de resistencias eléctricas, distribuidas uniformemente en paralelo. [Fuente: Elaboración propia]	28
Figura 2.5: Factor de vista para áreas planas y paralelas. [Fuente: (Incropera & Dewit, 2011)]	30
Figura 2.6: Máquina completa. [Fuente: Elaboración propia]	32
Figura 2.7: sistema de calentamiento. [Fuente: Elaboración propia]	32
Figura 2.8: Sistema de vacío. [Fuente: (Throne, 2017)]	33
Figura 2.9: Sistema de vacío real. [Fuente: Elaboración propia]	34
Figura 2.10: Forma básica de la mesa de vacío. [Fuente: Elaboración propia.]	34
Figura 2.11. Mecanismo de sujeción de la lámina. [Fuente: (Calle & sánchez, 2017)]	35
Figura 2.12: Marco de sujeción de la lámina. [Fuente: elaboración propia]	36
Figura 2.13: Marco de sujeción de la lámina, vista en CAD. [Fuente: elaboración propia]	36
Figura 2.14: Sistema pistón neumático del mecanismo de transmisión de potencia para subir y bajar el marco porta lámina. [Fuente: (Neuma & Winkel, 2019)]	37
Figura 2.15: Sistema neumático. Vista en CAD. [Fuente: elaboración propia]	37
Figura 2.16. Máquina. Vista isométrica. Foto real. [Fuente: elaboración propia]	38
Figura 3.1: Bomba de vacío, modelo RV8 de 1.5CFM. [Fuente: (EquipNet, 2022)]	42
Figura 3.2: Modelo teórico del tanque para acumular vacío. [Fuente: (Calle & sánchez, 2017)]	42
Figura 3.3: Tanque de vacío para el mecanismo de aire comprimido. [Fuente: FIPA]	43
Figura 3.4: Diagrama utilizado para el sistema de vacío para realizar la succión de aire en el molde. [Fuente: (Calle & sánchez, 2017)]	44
Figura 3.5: Marco de sujeción de la lámina termoplástica. [Fuente: (Calle & sánchez, 2017)]	44
Figura 3.6: Esquema del sistema de cilindros neumáticos para subir y bajar el marco de sujeción de la lámina. [Fuente: (Calculation, 2022)]	45
Figura 3.7: a) Tanque compresor del laboratorio de termoplásticos. b) Válvulas neumáticas. [Fuente: Elaboración propia]	45
Figura 3.8: Parte superior de la máquina. Se aprecia el marco (1) y cilindros neumáticos (2). [Fuente: Elaboración propia]	46
Figura 0.1: Bomba de paletas rotativas RV8. Partes. [Fuente: (Edwards Vacuum, 2017)] ...	70

Figura 0.2: Bomba de paletas rotativas RV8. Curvas de rendimiento. [Fuente: (Edwards Vacuum, 2017)]	71
Figura 0.3: Bomba de paletas rotativas RV8. Curvas de rendimiento. [Fuente: (Edwards Vacuum, 2017)]	72
Figura 0.4: Tanque de vacío. Fuente: [(Jiangsu Youcheng Zhixin Mechanical And Electrical Equipment Co., 2022)	73
Figura 0.5: Regulador del filtro de la Unidad de Tratamiento de fuente de aire neumática. Fuente: [(Ningbo Niubide Automation Technology Co., 2022)	74
Figura 0.6: Kits de sello de cilindro neumático, conjunto de piezas de reparación, serie SI estándar ISO6431. [Fuente: (Ningbo Niubide Automation Technology Co., 2022)]	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Temperaturas de formado para selección de materiales. [Fuente: (Klein, 2009)]	8
Tabla 1.2: Propiedades del Poliestireno y Polipropileno. [Fuente: ANSYS Granta 2019]	10
Tabla 2.1: Especificaciones del termoplástico a emplearse. [Fuente: Elaboración propia]	15
Tabla 2.2: Comparación por pares para criterios de diseño. [Fuente: Elaboración propia]	17
Tabla 2.3: Criterios ponderados en orden de importancia. [Fuente: Elaboración propia]	18
Tabla 2.4: Carta morfológica. [Fuente: elaboración propia]	19
Tabla 2.5: Puntajes para la selección de alternativas de diseño. [Fuente: Elaboración propia]	20
Tabla 2.6: Alternativas de diseño para el marco de sujeción de la lámina. [Fuente: Elaboración propia]	21
Tabla 2.7 Alternativas de diseño para el sistema de calentamiento. [Fuente: Elaboración propia]	21
Tabla 2.8: Alternativas de diseño para el sistema de vacío. [Fuente: Elaboración propia]	22
Tabla 2.9: Alternativas de diseño para el tipo de molde. [Fuente: Elaboración propia]	22
Tabla 2.10: Alternativas de diseño para el tipo de mesa de vacío. [Fuente: elaboración propia]	23
Tabla 2.11: Alternativas de diseño para el sistema de enfriamiento. [Fuente: elaboración propia]	23
Tabla 2.12: Alternativas ganadoras para cada sistema de la máquina de termoformado. [Fuente: Elaboración propia]	24
Tabla 2.13: Dimensiones de las láminas termoplásticas. [Fuente: elaboración propia]	27
Tabla 2.14: Referencia a la tabla 2.1: Temperaturas de formado para selección de materiales. [Fuente: (Klein, 2009)]	27
Tabla 2.15: Características dimensionales de las láminas de HDPE y HIPS. [Fuente: Elaboración propia]	31
Tabla 3.1: Valores de calor máximo emitido por el sistema de calentamiento. [Fuente: elaboración propia]	39
Tabla 3.2: Tiempos de exposición de la lámina al arreglo de resistencias, con espesores que varían entre 0.5mm y 5mm. [Fuente: elaboración propia]	39
Tabla 3.3: Especificaciones del tanque de acumulación de vacío	43
Tabla 3.4. Estimación de costos [Fuente: Proyecto para materia integradora presentada bajo el “Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio” [Fuente: Repositorio FIMCP]	47
Tabla 3.5: Equipos principales de la máquina de termoformado. [Fuente: elaboración propia]	47
Tabla 3.6: Materiales de construcción. [Fuente: elaboración propia]	48
Tabla 3.7. Costos de mano de obra. [Fuente: elaboración propia]	49
Tabla 3.8: Costos directos totales. [Fuente: elaboración propia]	49
Tabla 3.9: Costos indirectos totales. [Fuente: elaboración propia]	49
Tabla 3.10: Costos totales del proyecto. [Fuente: elaboración propia]	50

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1: Ensamble de la máquina de termoformado.....	57
Plano 2: Estructura principal.....	58
Plano 3: Sistema neumático.....	59
Plano 4: Soporte auxiliar del marco.	60
Plano 5: Parante superior.....	61
Plano 6: Marco de sujeción de lámina.	62
Plano 7: Lámina termoplástica.	63
Plano 8: Horno.	64
Plano 9: Soporte lateral derecho del horno.....	65
Plano 10: Soporte lateral izquierdo del horno.....	66

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

La industria de los polímeros está en auge desde hace ya varias décadas, y aunque su uso inconsciente podría ser perjudicial para el medio ambiente; actualmente las regulaciones, normativas y estándares, garantizan que las empresas manufactureras sean ecológicamente responsables, obedeciendo quiérase o no los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la agenda del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para 2030. Obedecer estos estándares permite tener la tranquilidad de que la empresa o industria manufacturera apuntará a objetivos de sostenibilidad medioambiental y un correcto desarrollo rural; y de manera especial al tener polímeros de por medio, es necesario que se apunte a buenas prácticas de circularidad.

La industria del termoformado ha popularizado su uso al área de alimentos, medicinal, automotriz y de herramientas; y alguna que otra empresa lo usa para sus campañas publicitarias pegando su publicidad en supermercados, casas distribuidoras y tiendas de barrio. El uso de estas técnicas requiere de nuevas ideas y gente con buena formación en dichas áreas, por lo que formar profesionales altamente capacitados es clave para la socialización de estas prácticas en la industria. La implementación una máquina de termoformado a las prácticas de laboratorio académicas, permitirá a los estudiantes adquirir pericia y habilidades competentes frente a la inminente oleada comercial y tecnológica del siglo XXI.

Los estudiantes politécnicos, a lo largo de la historia han presentado una gran capacidad y afinidad a los procesos ingenieriles aplicables a la industria nacional e internacional. Para lo cual, la ESPOL en gran parte ha sido copartícipe de dichos aprendizajes, ofreciendo sus versátiles laboratorios con muchas máquinas especializadas por área. Sin embargo, el surgimiento de la nueva carrera de Ingeniería en Materiales y los diplomados de procesamientos en plásticos, exigen cada vez más y mejores prestaciones, por lo que se pretende que la máquina de termoformado sea parte de los ya existentes equipos en el laboratorio de procesamiento de plásticos de la FIMCP.

La propuesta para implementar la máquina de termoformado surgió como una necesidad del laboratorio de plásticos de la FIMCP, y como respuesta a ello; luego de haber tratado

el tema cuidadosamente se solicitó la creación de una tesis que permita materializar dichas ideas. Para ello el proceso de prototipado se realizó de manera completa, desde la concepción de la idea, hasta la creación de la máquina e instalación para su correspondiente uso.

El termoformado no es una técnica nueva, sin embargo; desde su surgimiento que data del desarrollo de la segunda guerra mundial (Plastiglas, 2020), su popularidad ha sido imparable. Actualmente, es una de las técnicas más utilizadas en la industria del empaque, empaques para alimentos, transporte, artículos para el hogar, industria médica, agricultura y horticultura, construcción, vivienda, equipaje, entre otros.

Debido a la amplia aplicabilidad y alcance que el termoformado tiene en la industria, es necesaria una formación integral de técnica y conocimiento en el área. Para ello, se pretende que la máquina sirva como medio de adquisición de conocimientos.

1.1 Definición del problema

El laboratorio de procesamiento de plásticos de la ESPOL con miras a mejorar su capacidad para poder ofertar capacitación solicita que se colabore en el desarrollo de una tesis para el diseño y prototipado de una máquina de termoformado que sirva para la formación académica de los alumnos de las carreras de la FIMCP y otras facultades, además de servir para ofertar capacitaciones vía diplomados y brindar servicios a la industria.

Se tomará como base un diseño de máquina de termoformado presentada en la FIMCP como tesis en 2017, donde se propuso un diseño enfocado a ser aplicado en laboratorio, sin embargo; no se consideró que el uso de la tarjeta arduino empleada estaría restringida, en el mejor de los casos a una vida útil de máximo cinco años. Lo cual es un gran limitante para su uso constante en el laboratorio, y con mayor razón si lo que se desea es confiabilidad al momento de realizar el termoformado. Ya que, no solo estará dirigido a la academia, sino también para prestaciones a la empresa privada. Por lo que se requiere un sistema más robusto y confiable. Por tal motivo, se construirá una máquina de termoformado semiautomática, donde su sistema de control estará conformado básicamente por componentes eléctricos y electromecánicos, gracias a las nuevas prestaciones industriales a disposición hoy en día en la industria local.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Construir una máquina de termoformado que permita la utilización de láminas termoplásticas para la producción de piezas y moldes mediante el formado al vacío.

1.2.2 Objetivos específicos

- Construir un sistema neumático para el posicionamiento de la lámina termoplástica sobre el molde de termoformado.
- Implementar el uso controlado del sistema de termoformado, de manera que el mismo funcione de forma semiautomática a partir de la colocación de la plancha fría sobre la sección respectiva de la máquina.
- Implementar el sistema de termoformado para trabajar con planchas de polietileno de alta densidad (HDPE) y poliestireno de alto impacto (HIPS).
- Proponer una práctica de laboratorio para estudiantes de pregrado. El fin de esta práctica será familiarizar a los estudiantes con el tratamiento de materiales, y en este caso de manera particular “polímeros enfocados en termoplásticos”.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Polímeros

“La palabra polímero significa “muchas partes”, motivo por el cual un material polimérico es considerado básicamente como la unión de muchas partes. Estas partes se unen mediante enlaces moleculares llamados enlaces covalentes.” (Smith, 2006)

De manera general, todos los termoplásticos tienen la capacidad de ser empleados en procesos de termoformado. Lo que los diferencia, son básicamente las características mecánicas intrínsecas del material. Para que un material sea termoformable, es condición necesaria que este sea capaz de alcanzar su temperatura de revenido sin perder sus propiedades, quemarse o echarse a perder.

1.3.2 Normas y códigos

NTE INEN 1373: Esta norma técnica ecuatoriana proporciona las herramientas y exigencias que deben cumplir los sistemas de termoformado e inyección.

ISO 6259-2: Indica los métodos realizar ensayos de tracción en láminas termoplásticas.

NTE INEN-ISO 1043-1: Proporciona las características y simbología de termoplásticos y otros polímeros, apuntando en particular a sus características físicas y mecánicas.

NTE INEN -ISO 2507-1: Se enfoca en resaltar las características que deben cumplir las tuberías y accesorios fabricados mediante termoformado.

ISO 11607:2019: Especificaciones de los requisitos que deben cumplir los materiales termoformables aplicables al packaging, garantizando esterilidad y buenas prácticas de manufactura.

BS EN 12409:2008: Este es un estándar europeo que engloba las características principales que debe cumplir el ensamblaje de máquinas de termoformado, de hecho, es muy utilizada para fines de auditoría.

ASTM E659: Este estándar indica las temperaturas de auto ignición de materiales sometidos a altas temperaturas.

UNE-EN 12409:2009+A1:2012: Normativa española que proporciona los requisitos fundamentales para la fabricación de máquinas de termoformado. Es muy utilizada en la industria que trabaja con partes de maquinaria que implican el uso de termoplásticos y elastómeros.

Code of Practice and guidance L22 by HSE: Proporciona las normativas básicas para la utilización de equipos industriales que conlleven el tratamiento de altas temperaturas.

Leaflet INDG271(rev1) HSE Books 2011: Indica las regulaciones que debe cumplir una máquina o equipo nuevo, previo a su puesta en marcha.

1.3.3 Gestión de proyecto

El proyecto inició como una propuesta abierta hecha por el laboratorio de plásticos. La cual tomó efecto luego del interés del autor de este proyecto por darle vida a una tesis de similar título ya planteada solo de manera teórica en 2017.

1.3.4 Consideraciones en los costos

Este proyecto, debido a que será básicamente para uso académico, no pretende tener gran repercusión comercial a nivel industrial, sin embargo; las prestaciones del producto

final sí que podrían ser dirigidas a la empresa privada, vía capacitación en diplomado o ya sea para investigación o ensayos de materia prima de la industria.

El impacto comercial está dirigido fundamentalmente a enriquecer la capacidad de prestación de servicios del laboratorio.

Sin embargo, sí hay costos de por medio, tantos directos como indirectos. Los detalles se dan en el capítulo 3.4

La máquina será construida en un taller externo a las instalaciones politécnicas, hay piezas que se deben cambiar con respecto a la propuesta realizada en 2017, debido a mejoras técnicas y de rendimiento. El hecho de que la construcción de la máquina sea un prototipo, implica encontrar los mejores proveedores en cuanto a calidad y precio. Por lo que, los valores de la tabla 1, no reflejan la realidad del actual proyecto; aunque sí se acerca bastante.

1.3.5 Ética en Diseño

La buena aplicabilidad de normas no es suficiente para decirse que un diseño es bueno o malo, es ahí donde entra la ética, las normas y códigos vistos en la sección 1.2.2. En el momento donde se hace un match entre la ingeniería, la tecnología y las demandas sociales, se apunta a crear proyectos realmente sostenibles. Y no solo buenos. Por ejemplo, las terribles armas atómicas usadas en la segunda guerra mundial podrían ser categorizadas como un “buen proyecto ingenieril”, sin embargo; lo aleja totalmente de la ética y empatía.

El diseñador mecánico está casi que, obligado a arrimarse a buenas prácticas de manufactura, pero más que eso a seguir normativas de diseño, pero también normativas sociales. De hecho, para 2030 la ONU ha propuesto cumplir con 17 objetivos para un desarrollo sostenible. Por lo que, si un ingeniero pretende diseñar, debe abarcar también la repercusión que este tendrá en el planeta y por lo tanto sobre la misma sociedad que lo rodea, he ahí la ética profesional.

Existen múltiples entes que permiten al ingeniero de diseño tener una guía fiable en cuanto a diseño. Uno de los entes más importante hoy en día es la sociedad ASME, quien como parte regulatoria de su membresía requiere que sus miembros sigan y adopten un código de ética según su Constitución, Artículo C2.1.1. Se resaltan tres

principios básicos de ASME, los cuales son dignos de imitar, no solo para Ingenieros Mecánicos, sino para todo aquel que pretenda generar un equipo o estructura, que afecte de manera directa o indirecta a la sociedad:

- I. “Utilizar los conocimientos y habilidades para mejorar el bienestar humano” (ASME, 2012)
- II. “Ser honesto e imparcial y servir con fidelidad a sus clientes (incluidos sus empleadores) y al público” (ASME, 2012)
- III. “Esforzarse por aumentar la competencia y el prestigio de la profesión de ingeniería” (ASME, 2012)

1.3.6 Efecto de la temperatura en los termoplásticos

La creciente demanda de materiales para la industria ha generado gran impacto en la sociedad científica, por lo que múltiples estudios han estado de por medio. En la figura 1, se indican los materiales poliméricos más comunes utilizados en termoformado, y se muestra de forma explícita las temperaturas de deflexión al calor y sus correspondientes temperaturas de termoformado, resaltando los materiales propuestos en este proyecto.

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

Figura 1.1. Polímeros termoplásticos más comunes y sus temperaturas de deflexión al calor y su correspondiente temperatura de termoformado. Fuente: (Plastiglas, 2020)

1.3.7 Termoformado

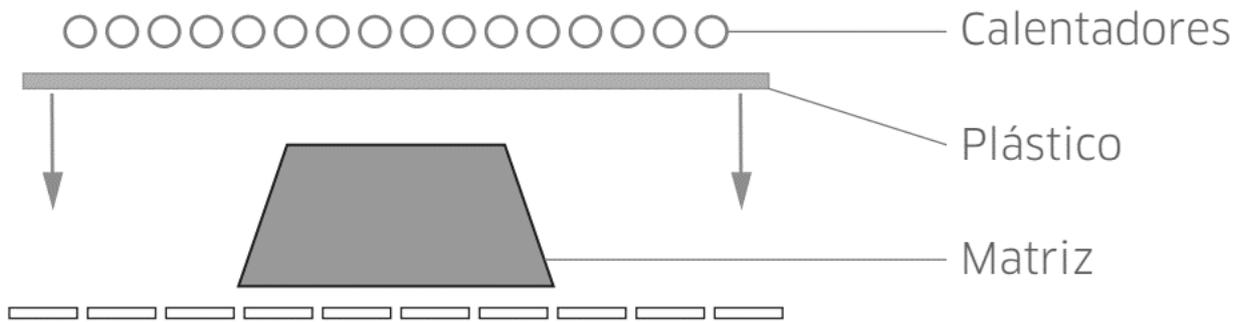


Figura 1.2. Esquema del principio básico de termoformado una vez posicionada la plancha. Fuente: Fabrinco

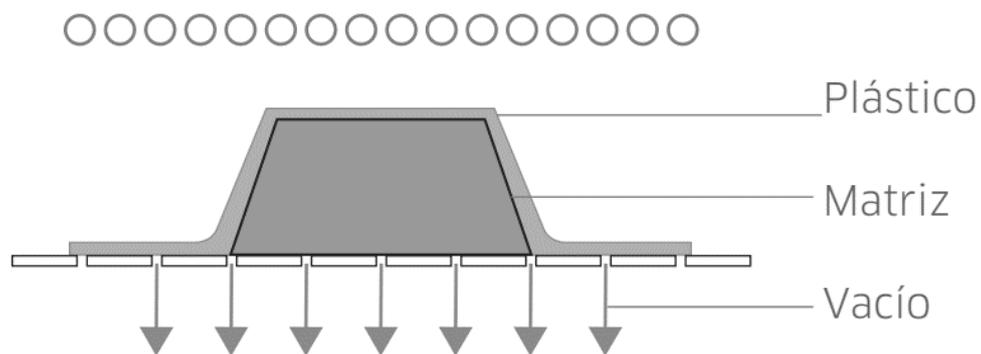


Figura 1.3. Esquema del principio básico de termoformado una vez aplicada la succión por vacío. Fuente: Fabrinco

1.3.8 Técnica de termoformado

El termoformado representa tan solo una de tantas formas en las cuales se puede prototipar un artículo u objeto. Sin embargo, para ejecutar una buena técnica en termoformado, no solo se necesita llevar una plancha de termoplástico a su temperatura de cuasi fusión, sino también tener la capacidad de que cuando se llega a este punto, poder manipularla correctamente, y con velocidad y fuerza apropiada colocarla sobre el molde previo al formado.

1.3.9 Temperaturas importantes en el proceso de termoformado

Tabla 1.1: Temperaturas de formado para selección de materiales. [Fuente: (Klein, 2009)]

Material	Temperatura mínima de Formado [°C]	Temperatura normal de formado [°C]	Temperatura máxima de formado [°C]
ABS	260	300	360
Acrílico	300	350	380
Policarbonato	335	375	400
PETE	250	300	330
HDPE	260	295	360
PP	290	320	330
HIPS	260	300	360
PVC	220	280	310

Para este proyecto se ha decidido trabajar con HDPE y HIPS, pues; además de ser termoplásticos de los más utilizados actualmente en la industria local e internacional, son referentes de propiedades mecánicas muy distantes (ver figura 5). Por ejemplo, se ha tomado como referencia dos de las características más importantes, tales como; el módulo de Young y la elongación con respecto a este.

En la figura 4 se aprecian las propiedades mencionadas que estos materiales poliméricos presentan frente a los demás existentes en la industria.

Luego, en la figura 5, se resaltan específicamente los polímeros termoformables en color azul claro, y en azul oscuro, los no termoformables. De entre estos, se resaltan el PE y el PS, los cuales corresponden a los dos materiales representativos para este trabajo.

Finalmente, y para diferenciar claramente las propiedades térmicas, mecánicas, eléctricas, entre otras; se presenta la tabla 3, en la cual se resumen las características más importantes tomadas en cuenta para consideraciones ingenieriles.

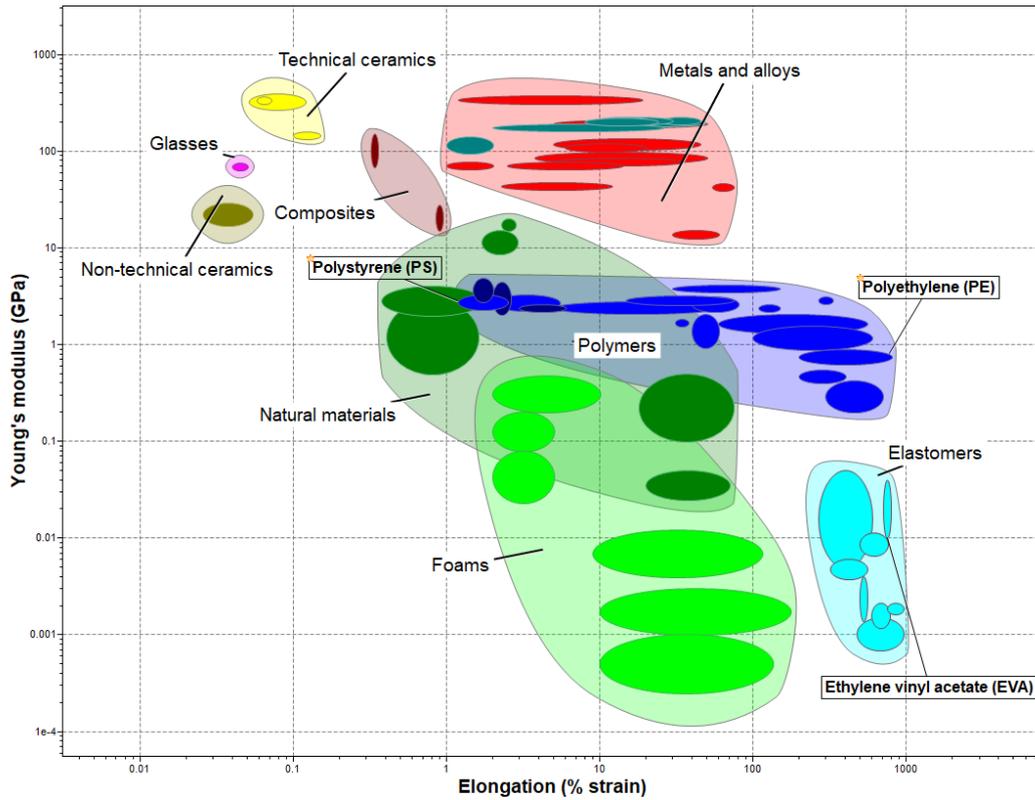


Figura 1.4: Módulo de Young vs Elongación de los materiales. [Fuente: elaboración propia en ANSYS Granta 2019]

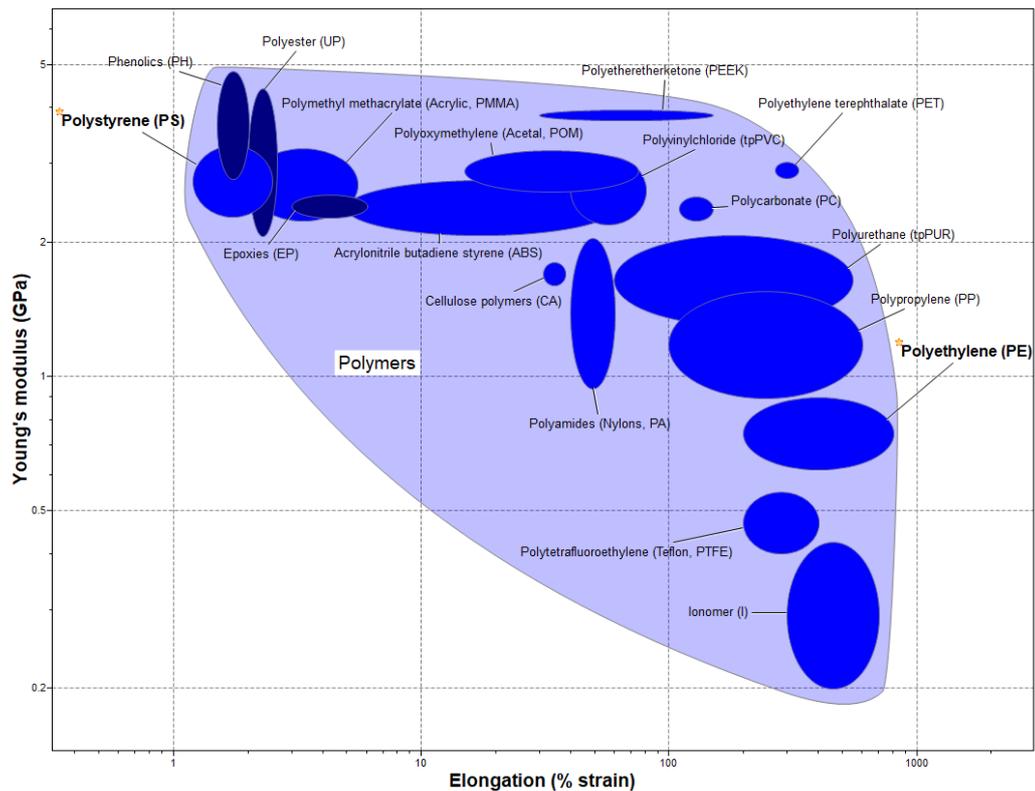


Figura 1.5: Materiales poliméricos. Se resaltan el poliestireno y el polietileno. [Fuente: elaboración propia en ANSYS Granta 2019]

Tabla 1.2: Propiedades del Poliestireno y Polipropileno. [Fuente: ANSYS Granta 2019]

Propiedad		Poliestireno (PS)	Polietileno (PE)
Propiedades generales	Densidad	$1.04 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	939 ~ 960 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	Precio	2.04 ~ 2.37 $\frac{\text{USD}}{\text{kg}}$	1.59 ~ 1.65 $\frac{\text{USD}}{\text{kg}}$
Propiedades mecánicas	Módulo de Young	2.28 ~ 3.28 GPa	0.621 ~ 0.896 GPa
	Esfuerzo de fluencia (límite elástico)	28.7 ~ 41.4 MPa	17.9 ~ 29 MPa
	Esfuerzo último	35.9 ~ 51.7 MPa	20.7 ~ 44.8 MPa
	Elongación	1.2 ~ 2.5 % strain	200 ~ 800 % strain
	Hardness (Vickers)	9.04 ~ 12 HV	5.4 ~ 8.7 HV
	Esfuerzo de fatiga a 10^7 ciclos	14.4 ~ 20.7 MPa	21 ~ 23 MPa
	Tenacidad a la fractura	0.702 ~ 1.1 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$	1.44 ~ 1.72 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$
Propiedades térmicas	Punto de fusión		125 ~ 132 °C
	Temperatura máxima de servicio	75.9 ~ 89.9 °C	90 ~ 110 °C
	Conductor o aislante	Buen aislante	Buen aislante
	Conductividad térmica	0.12 ~ 0.14 $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°C}}$	0.403 ~ 0.435 $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°C}}$
	Capacidad de calor específico	$1.2 \times 10^3 \sim 1.3 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$	$1.81 \times 10^3 \sim 1.88 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$
	Coefficiente de expansión térmica	89.9 ~ 150 $\frac{\mu\text{strain}}{\text{°C}}$	126 ~ 198 $\frac{\mu\text{strain}}{\text{°C}}$
Propiedades eléctricas	Conductor a aislante	Buen aislante	Buen aislante
Propiedades ópticas	Transparencia	Cualidades ópticas	Traslúcido
Eco Propiedades	Energía de producción	78.2 ~ 86.2 $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$	76.1 ~ 83.9 $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$
	Huella de carbono	2.4 ~ 2.64 $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$	1.77 ~ 1.95 $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$
	Reciclabilidad	6 veces	HDPE: 2 veces LDPE: 4 veces
Información adicional	Usos típicos	Juguetes Difusores de luz	Juguetes Contenedores de aceite

Lentes y espejos	Postes o bolardos
Mostradores	Botellas de leche
Audio y vídeo	Empaques
Electrónicos	Ropa
Líneas de refrigeración	Bolsas
Etc.	Aislantes de cables
	Sogas de bajo costo
	Etc.

1.3.10 Parámetros a evaluar en la máquina de termoformado

La construcción del equipo de termoformado a más de ser utilizado para prácticas de laboratorio, será manipulado por profesores y estudiantes. Por lo que se requiere; sin excusas, altas prestaciones que garanticen seguridad física al momento de realizar cualquier tipo de manipulación.

Tipo de material permitido: De manera global cualquier termoplástico de la figura 5, pero de manera particular HDPE y HIPS

Capacidad de succión por vacío: 1 *hp*, 1.5 *CFM*, 150 *L*

Dimensiones del marco para ubicar la lámina: 520 x 520 *mm*²

Tipo de conexión a la red eléctrica: 220 *V*, 60 *Hz*

1.3.11 Temperatura en el proceso de calentamiento de las láminas

Una de las etapas de mayor importancia y que requieren especial atención, es justamente la que corresponde a la de calentamiento de la lámina. Para que este proceso sea llevado a cabo de manera correcta y sin pérdidas de material y/o tiempo se realiza a continuación el análisis de transferencia de calor que debe enfrentarse al tratar con láminas termoplásticas.

Un dato importante a tener en cuenta, es justamente la temperatura máxima que la máquina es capaz de proporcionar, la cual está limitada por las características propias de las resistencias eléctricas, la cual para este proyecto, como máximo pueden alcanzar hasta 600°C, lo cual puede ser controlado al variar la intensidad de corriente que ingresa a las resistencias mediante un potenciómetro.

Puntos de mucha importancia en la transferencia de calor de las láminas:

- Conducción: “Es el proceso mediante el cual se trasfiere calor de un cuerpo a otro por contacto directo entra las superficies de ambos.” (RAING, 2022)
- Convección: “Es aquel proceso mediante el cual se trasfiere calor de un cuerpo a otro, pero para ello se utiliza como medio de trasmisión un fluido, generalmente este fluido es de tipo sólido o líquido.” (RAING, 2022)
- Radiación: “Este es un proceso mediante el cual se transfiere calor de un cuerpo a otro, pero sin que ambos entres en contacto. Es decir, interactúan a distancia, utilizando como medio de transmisión ondas electromagnéticas, y se mide en términos de densidad de flujo de energía ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$).” (RAING, 2022)

En la práctica los tres conceptos convergen al mismo fin, pues; el proceso de termoformado, no podría ser posible si esto no fuera así.

En termoformado los conceptos y procesos más utilizados son la conducción y la radiación. Los cuales pueden variar entre temperaturas que dependiendo del material pueden oscilar entre 120°C y 205°C (Plastiglas, 2020)

CAPÍTULO 2

2 METODOLOGÍA DEL DISEÑO

El sistema que se está proponiendo es básicamente la construcción de una máquina para realizar termoformado de láminas termoplásticas, específicamente sobre láminas de HDPE (polietileno de alta densidad) y HIPS (poliestireno de alto impacto). El sistema debe estar compuesto de la mesa para el molde y los brazos que permitirán transportar la lámina hacia las resistencias y luego hacia el molde, para una posterior succión de vacío.

Para ello se debe además contar con el sistema de generación de vacío, el cual está compuesto de la bomba de vacío y un tanque de vacío o acumulador.

Se propone que el sistema sea semiautomático, es decir; que, a partir de la colocación de la lámina y las respectivas configuraciones de los parámetros térmicos, según el termoplástico que se vaya a termoformar, el sistema funcione de la siguiente manera:

- Colocar la lámina termoformable sobre a sección respectiva
- Los brazos hidráulicos, una vez que reciben la lámina y es ajustada por el operador, queda lista para acercarla a las resistencias
- La lámina termoplástica es acercada a las resistencias, hasta que alcance su temperatura de ablandamiento para formado.
- La lámina es bajada hasta ponerla en contacto con el molde, para de inmediato aplicar succión de vacío a la superficie sobre la cual está el molde con la lámina caliente.
- Una vez que la lámina ha adquirido la forma del molde, esta debe ser enfriada y luego desmoldada.

2.1 Requerimientos de diseño

La máquina debe cumplir con estándares de seguridad para que funcione con normalidad en el laboratorio de plásticos de la FIMCP, además de que se debe tomar en cuenta la factibilidad para que la misma sea utilizada para prestar servicios de manera privada. Por este motivo, los criterios de diseño se enfocan en satisfacer estos requerimientos, los cuales; luego serán evaluados en una correspondiente matriz de ponderación, pudiendo

así con las mejores ponderaciones, realizar una carta morfológica con las distintas alternativas de solución.

- Debe contar con altas prestaciones y ofrecer seguridad al usuario al momento de manipularla.
- Debe ser reutilizable.
- Debe ser amigable con el medio ambiente, enfocándose siempre en la adaptabilidad a buenas prácticas de manufacturas y sostenibilidad. Básicamente acero, aluminio, lana de vidrio y otros aislantes.
- Debe poseer un mecanismo que permita asegurar la movilidad global del equipo de manera horizontal y vertical.
- Debe ser fácil de instalar.
- Debe ser construida con materiales inocuos.
- No debe poseer filos. Pues esto beneficiaría a guardar la integridad física del operador de la máquina.
- Los repuestos deben ser de fácil adquisición, de preferencia que puedan ser adquiridos a nivel nacional.
- Debe poseer buena capacidad aislante. Debido a las altas temperaturas, se debe buscar minimizar al máximo las temperaturas a las que el operador esté expuesto.
- Debe ser capaz de adaptarse a distintos moldes para termoformado. Las dimensiones máximas del molde aceptable son 300 x 300 mm²
- Debe ser silencioso
- Debe poseer un marco adaptable a diferentes dimensiones de las planchas de HDPE o HIPS a ser moldeadas
- Temperatura máxima en el equipo: 350°C
- Peso mínimo del equipo: 25 kgf
- Capacidad máxima de la bomba de vacío 1 hp, 10 CFM y un tanque de 150 L
- Conexión eléctrica adaptable a 220 voltios, a 60 Hertz.
- Opera con normalidad a temperatura ambiente
- Fácil adaptabilidad del sistema de control: componentes eléctricos, relés, contactores, temporizadores, entre otros
- Dimensiones máximas totales de la máquina: 1.0x1.0x1.6 m³

Tabla 2.1: Especificaciones del termoplástico a emplearse. [Fuente: Elaboración propia]

Criterios	Material	HDPE	HIPS
		//Polietileno de alta densidad	//Poliestireno de alto impacto
Temperatura de formado [°C]	Mínima	260	260
	Normal	295	300
	Máxima	360	360
Dimensiones máximas de la lámina [mm]		520	520
Espesor máximo [mm]		5	5

2.2 Categorización de la lista de atributos

Objetivos de diseño

- Debe contar con altas prestaciones y ofrecer seguridad al usuario al momento de manipularla
- Debe ser reutilizable
- Debe ser amigable con el medio ambiente, enfocándose siempre en la adaptabilidad a buenas prácticas de manufacturas y sostenibilidad. Básicamente acero, aluminio, lana de vidrio y otros aislantes
- Debe ser fácil de instalar
- Debe ser construida con materiales inocuos
- No debe poseer filos. Pues esto beneficiaría a guardar la integridad física del operador de la máquina
- Los repuestos deben ser de fácil adquisición, de preferencia que puedan ser adquiridos a nivel nacional
- Debe ser silencioso

Restricciones

- Debe ser capaz de adaptarse a distintos moldes para termoformado. Las dimensiones máximas del molde aceptable son $520 \times 520 \text{ mm}^2$
- Temperatura máxima en el equipo: 350°C Peso mínimo del equipo: 25 kgf
- Capacidad máxima de la bomba de vacío 1 hp, 10 CFM y un tanque de 150 L
- Conexión eléctrica adaptable a 220 voltios, a 60 Hertz
- Opera con normalidad a temperatura ambiente

- Dimensiones máximas totales de la máquina: $1.0 \times 1.0 \times 1.6 \text{ m}^3$

Funciones

- Debe poseer un mecanismo que permita asegurar la movilidad global del equipo de manera horizontal y vertical
- Debe poseer un marco adaptable a diferentes dimensiones de las planchas de HDPE o HIPS a ser moldeadas
- Fácil adaptabilidad del sistema de control: componentes eléctricos, relés, contactores, temporizadores, entre otros

2.3 Criterios de diseño

- **Tamaño:** Especifica las dimensiones en altura, fondo y ancho que tendrá la máquina, para su posterior adaptabilidad al interior de un laboratorio.
- **Automatización:** Especifica si la máquina funcionará de manera automática, semiautomática o totalmente manual.
- **Mantenimiento:** Se refiere a los mantenimientos mecánicos, eléctricos o electrónicos que pudiera conllevar la operabilidad de la máquina. Se pretende que los mantenimientos puedan ser solucionados por personas o entidades autorizadas, pero de manera local, evitando así pérdidas de tiempo por asistencia de mano extranjera.
- **Versatilidad:** Para esta máquina, se refiere a la capacidad de la máquina de ser adaptada para operar con distintos materiales, y no solo con los planteados en los objetivos.
- **Reutilizable:** Se refiere a la capacidad de la máquina de funcionar de manera óptima por varios para más de un ensayo o periodo académico, sin tener que recurrir a su reemplazo total por averías.
- **Precio:** Se refiere a la cantidad de dinero que debe ser invertido para que la construcción de la máquina de termoformado sea posible, de manera que se cumplan de manera correcta todos los objetivos de este proyecto.

2.4 Ponderación de criterios

En base a los criterios de diseño planteados, se propone una matriz de evaluación de los mismos, de manera que, bajo los parámetros de calificación para cada criterio; se pueda

evaluar las prioridades de la máquina, y por lo tanto a lo que habría que prestarle mayor atención al momento de elegir la mejor alternativa para el correspondiente diseño.

Tabla 2.2: Comparación por pares para criterios de diseño. [Fuente: Elaboración propia]

Criterio	Versatili dad	Prec io	Automatiza ción	Mantenimi ento	Tama ño	Reutiliza ble	Tot al	Pes o	Ponderació n [%]
Versatilida d	1.00	7.00	7.00	8.00	7.00	5.00	35.00	0.38	38.34
Precio	0.14	1.00	3.00	7.00	3.00	8.00	22.14	0.24	24.25
Automatiza ción	0.14	0.33	1.00	4.00	5.00	2.00	12.48	0.14	13.67
Mantenimie nto	0.13	0.14	0.25	1.00	5.00	8.00	14.52	0.16	15.90
Tamaño	0.14	0.33	0.20	0.20	1.00	3.00	4.88	0.05	5.34
Reutilizable	0.20	0.13	0.50	0.13	0.33	1.00	2.28	0.03	2.50
Gran total							91.30	1.00	100.00

Escala

- 1 = igual importancia
- 5 = mayor importancia
- 10 = más importante
- 1/5 = menor importancia
- 1/10 = menos importante

Importancia ↓ de mayor a menor en orden descendente

- Versatilidad
- Precio
- Automatización
- Mantenimiento
- Tamaño
- Reutilizable

La tabla 4 permite identificar cuál de los criterios es el más importante al momento de diseñar la máquina, el cual es claramente extensible para cuando la misma entre en operación. De esta tabla, se obtiene que el criterio más importante es la “versatilidad”, es decir; la capacidad que tiene la máquina de ser adaptable para trabajar con distintos materiales, más allá de los dos propuestos, es decir; el HDPE y el HIPS. De ello se puede deducir que; el equipo con mejores prestaciones será la mejor alternativa.

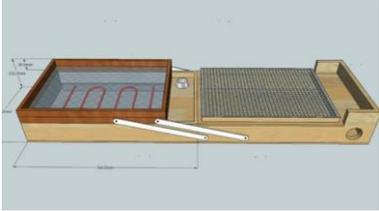
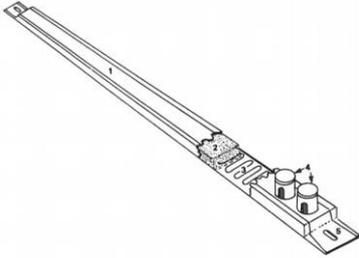
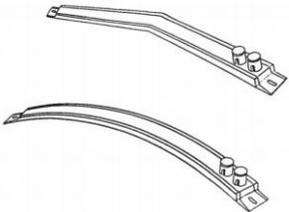
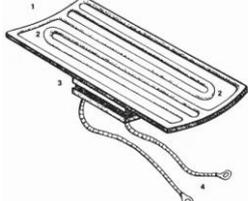
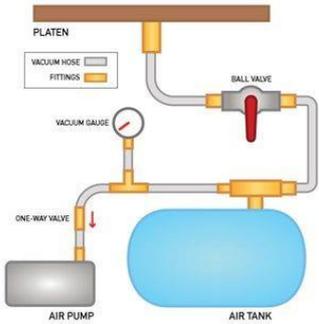
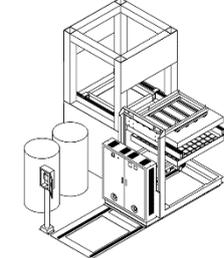
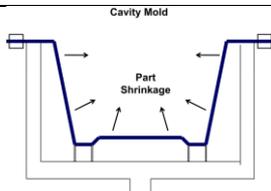
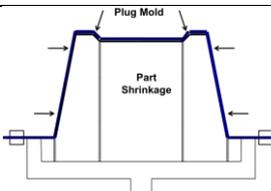
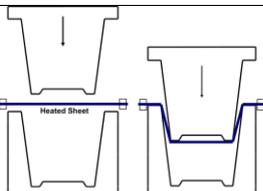
En la tabla 5, se resumen los demás criterios en orden de importancia para la construcción y operabilidad de la máquina de termoformado.

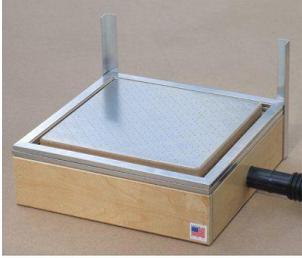
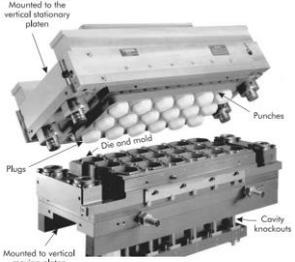
Tabla 2.3: Criterios ponderados en orden de importancia. [Fuente: Elaboración propia]

	Criterio	Ponderación [%]
Más importante	Versatilidad	38.34
	Precio	24.25
	Mantenimiento	13.67
↓	Automatización	15.90
	Tamaño	5.34
Menos importante	Reutilizable	2.50

2.5 Alternativas propuestas

Tabla 2.4: Carta morfológica. [Fuente: elaboración propia]

Sistema	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marco de sujeción para lámina termoplástica	 <p>Deslizable horizontal con sistema neumático (Klein, 2009)</p>	 <p>Deslizable vertical con sistema manual (Krix, 2012)</p>	 <p>Barras tipo Grashof manual (Duy, 2020)</p>
Calentamiento	 <p>Resistencias en forma de tiras (Florian, 1996)</p>	 <p>Resistencias en formas de arco (Florian, 1996)</p>	 <p>Por resistencias cerámicas con sensor (Florian, 1996)</p>
Generación de vacío	 <p>Tanque aislado (Krix, 2012)</p>	 <p>Tanque debajo de la mesa (Krix, 2012)</p>	 <p>Tanques exteriores (Chen, 2021)</p>
Tipo de molde			

	Molde Hembra (Klein, 2009)	Molde Macho (Klein, 2009)	Molde Macho – Hembra (Klein, 2009)
Mesa porta molde	 <p>Mesa ajustable (Rosen, 2017)</p>	 <p>Mesa tamaño fijo (York, 2019)</p>	 <p>Molde múltiple (Hong, 2020)</p>
Enfriamiento del objeto termoformado	 <p>Enfriamiento por ventilación (convección forzada) (Horton, 2019)</p>	 <p>Enfriamiento por aletas (Noguera, 2018)</p>	 <p>Ventilador de conducto (Soler, 2022)</p>

2.6 Selección de alternativas

En base a la carta morfológica y con los valores ponderados de los criterios de selección, se proceder a seleccionar la mejor alternativa para cada uno de los sistemas de la carta morfológica. Las formas en las que se calificará cada una de las alternativas radica en multiplicar el valor porcentual obtenido para cada criterio en la tabla 2.3 por los valores de la tabla 2.4, los cuales han sido determinados por el diseñador.

Tabla 2.5: Puntajes para la selección de alternativas de diseño. [Fuente: Elaboración propia]

Puntuación	Criterio
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular

Tabla 2.6: Alternativas de diseño para el marco de sujeción de la lámina. [Fuente: Elaboración propia]

Criterio	Alternativas de diseño para el marco de sujeción de la lámina						
	Ponderación	Deslizable horizontal		Deslizable vertical		Barras articuladas	
	%	Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada
Versatilidad	38.34	4	153.35	5	191.68	3	115.01
Precio	24.25	1	24.25	1	24.25	2	48.51
Mantenimiento	13.67	4	54.66	5	68.33	2	27.33
Automatización	15.90	2	31.80	2	31.80	1	15.90
Tamaño	5.34	3	16.02	4	21.36	2	10.68
Reutilizable	2.50	2	5.00	3	7.50	3	7.50
TOTAL	100.00	16.00	285.09	20.00	344.94	13.00	224.94

Tabla 2.7 Alternativas de diseño para el sistema de calentamiento. [Fuente: Elaboración propia]

Criterio	Alternativas de diseño para el sistema de calentamiento						
	Ponderación	Resistencias rectas		Resistencias curvas		Resistencias cerámicas tipo serpentín	
	%	Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada
Versatilidad	38.34	4	153.35	2	76.67	5	191.68
Precio	24.25	1	24.25	2	48.51	2	48.51
Mantenimiento	13.67	3	41.00	2	27.33	4	54.66
Automatización	15.90	1	15.90	1	15.90	1	15.90
Tamaño	5.34	3	16.02	3	16.02	5	26.71
Reutilizable	2.50	3	7.50	3	7.50	5	12.51
TOTAL	100.00	15.00	258.03	13.00	191.94	22.00	349.97

Tabla 2.8: Alternativas de diseño para el sistema de vacío. [Fuente: Elaboración propia]

Criterio	Ponderación %	Alternativas de diseño para el sistema de vacío					
		Tanque aislado		Tanque bajo la mesa		Tanques exteriores	
		Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada
Versatilidad	38.34	3	115.01	5	191.68	3	115.01
Precio	24.25	2	48.51	2	48.51	2	48.51
Mantenimiento	13.67	1	13.67	5	68.33	5	68.33
Automatización	15.90	5	79.51	4	63.61	3	47.71
Tamaño	5.34	2	10.68	3	16.02	5	26.71
Reutilizable	2.50	5	12.51	5	12.51	5	12.51
TOTAL	100.00	18.00	279.88	24.00	400.65	23.00	318.76

Tabla 2.9: Alternativas de diseño para el tipo de molde. [Fuente: Elaboración propia]

Criterio	Ponderación %	Alternativas de diseño para el tipo de molde					
		Molde hembra		Molde Macho		Molde macho y hembra	
		Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada
Versatilidad	38.34	5	191.68	5	191.68	4	153.35
Precio	24.25	2	48.51	2	48.51	2	48.51
Mantenimiento	13.67	4	54.66	5	68.33	3	41.00
Automatización	15.90	1	15.90	1	15.90	1	15.90
Tamaño	5.34	4	21.36	5	26.71	3	16.02
Reutilizable	2.50	5	12.51	5	12.51	5	12.51
TOTAL	100.00	21.00	344.62	23.00	363.63	18.00	287.28

Tabla 2.10: Alternativas de diseño para el tipo de mesa de vacío. [Fuente: elaboración propia]

Criterio	Ponderación %	Alternativas de diseño para el tipo de mesa de vacío					
		Mesa ajustable		Mesa tamaño fijo		Molde múltiple	
		Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada
Versatilidad	38.34	5	191.68	5	191.68	5	191.68
Precio	24.25	4	97.02	5	121.27	1	24.25
Mantenimiento	13.67	3	41.00	5	68.33	2	27.33
Automatización	15.90	3	47.71	2	31.80	4	63.61
Tamaño	5.34	3	16.02	5	26.71	2	10.68
Reutilizable	2.50	5	12.51	5	12.51	5	12.51
TOTAL	100.00	23.00	405.93	27.00	452.29	19.00	330.06

Tabla 2.11: Alternativas de diseño para el sistema de enfriamiento. [Fuente: elaboración propia]

Criterio	Ponderación %	Alternativas de diseño para el sistema de enfriamiento					
		Por convección forzada		Por aletas		Por conducto	
		Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada
Versatilidad	38.34	5	191.68	2	76.67	5	191.68
Precio	24.25	5	121.27	1	24.25	1	24.25
Mantenimiento	13.67	5	68.33	5	68.33	3	41.00
Automatización	15.90	1	15.90	5	79.51	5	79.51
Tamaño	5.34	3	16.02	1	5.34	3	16.02
Reutilizable	2.50	5	12.51	5	12.51	5	12.51
TOTAL	100.00	24.00	425.71	19.00	266.61	22.00	364.97

Con los resultados obtenidos en las tablas 2.6 a 2.11 se concluye que el sistema que se necesita construir deberá cumplir básicamente con las alternativas ganadoras, las cuales se resaltaron en cada tabla con un color gris. Además, las mismas se resumen en la tabla 2.12.

**Tabla 2.12: Alternativas ganadoras para cada sistema de la máquina de termoformado.
[Fuente: Elaboración propia]**

Sistema	Alternativa ganadora
Sujeción de la lámina	Deslizable vertical
Calentamiento	Resistencias cerámicas tipo serpentín
Tanque de vacío	Tanque bajo la mesa
Tipo de molde	Molde Macho
Mesa de vacío	Mesa tamaño fijo
Enfriamiento	Por convección forzada

2.7 Esquema de metodología de diseño

A partir del requerimiento de que el equipo de termoformado sería empleado dentro de un laboratorio académico, surgen las limitaciones y requisitos con los que se debe cumplir al momento de diseño y correspondiente prototipado. Lo cual conlleva también la elección correcta de los mejores parámetros de diseño para sus diferentes partes, tales como: el sistema de calentamiento, el sistema porta lámina, y el sistema de vacío.

La máquina fue ensamblada en un taller externo a las instalaciones de la ESPOL, sin embargo; dicho proceso pudo también haberse realizado en la propia Universidad. No obstante, algo que se debe tener muy en cuenta, es el lugar o espacio físico en el cual va a ser instalado el correspondiente equipo. Para lo cual hubo que primero tomar las precauciones respectivas en el laboratorio, donde el espacio físico no es todo lo que se debe considerar, sino también que exista una línea de aire comprimido, que la energía eléctrica disponible sea la correcta, que la ventilación sea aceptable sin necesidad de acondicionadores de aire, entre otros.

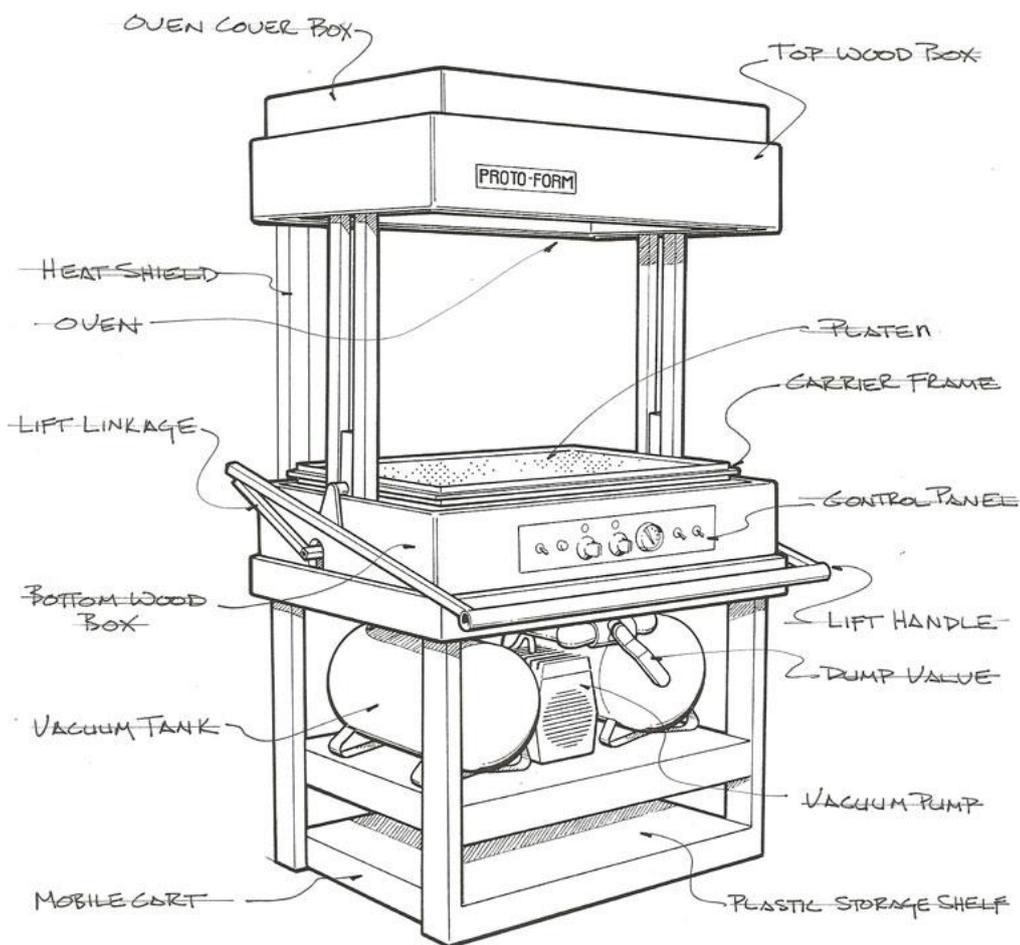


Figura 2.1: Posible diseño final de la máquina de termoformado. [Fuente: (Krix, 2012)]

En la figura 2.1 se aprecia el posible diseño final con el cual quedaría la máquina. Aunque, se debe recalcar que, en la mencionada figura se aprecia brazos para subir y bajar la lámina de manera manual. Sin embargo se pretende que este sistema sea automático (hidráulico).

2.8 Diseño conceptual

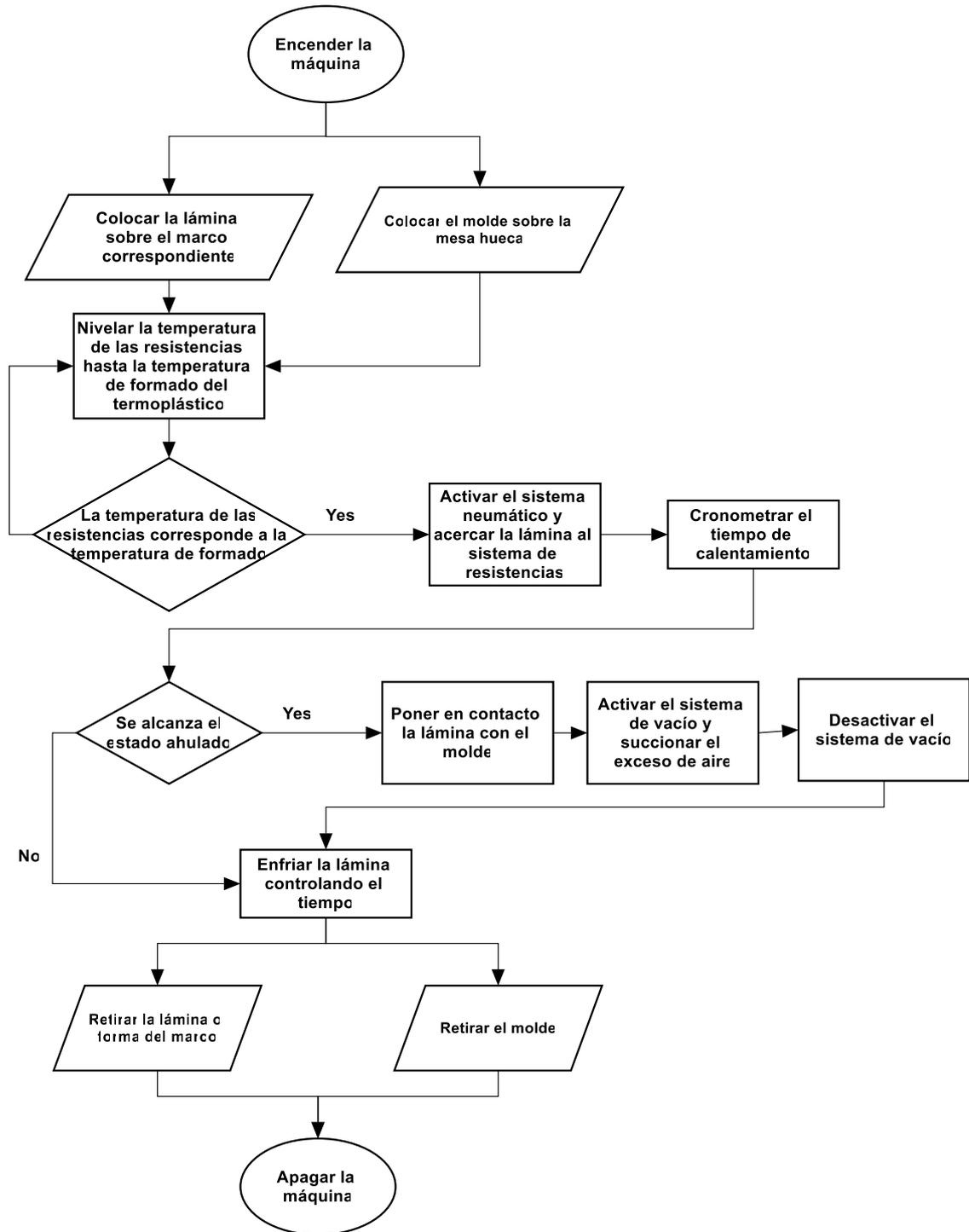


Figura 2.2: Diseño conceptual del proceso de termoformado. [Fuente: elaboración propia]

2.9 Láminas

Tabla 2.13: Dimensiones de las láminas termoplásticas. [Fuente: elaboración propia]

Material	Densidad	Ancho X	Fondo Y	Espesor W	Área A	Volumen V	Masa m
	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ³]	[kg]
HPDE	1.03E+03	520	520	1.5	270400	405600	0.41777
HIPS	960	520	520	1.5	270400	405600	0.38938

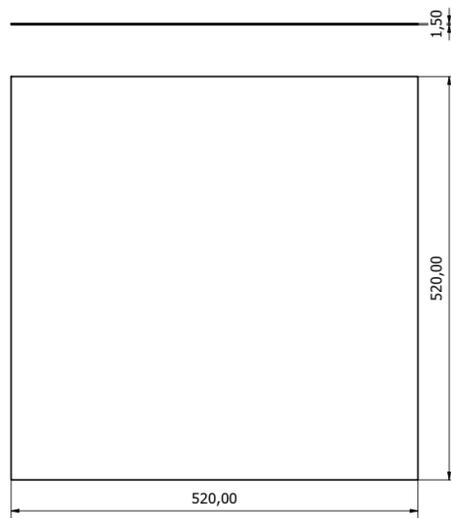


Figura 2.3: Dimensiones de la lámina termoplástica. [Fuente: elaboración propia]

2.10 Diseño del sistema de calentamiento

Como se menciona en el proceso de termoformado, previo a darle forma a la lámina, esta debe ser calentada hasta que se alcance una temperatura apropiada, en este caso esa temperatura corresponde a la temperatura de formado (ver tabla 2.1).

Tabla 2.14: Referencia a la tabla 2.1: Temperaturas de formado para selección de materiales. [Fuente: (Klein, 2009)]

Material	Temperatura mínima de Formado [°C]	Temperatura normal de formado [°C]	Temperatura máxima de formado [°C]
ABS	260	300	360
Acrílico	300	350	380
Policarbonato	335	375	400
PETE	250	300	330
HDPE	260	295	360
PP	290	320	330

PS	260	300	360
PVC	220	280	310

Para alcanzar dichas temperaturas es necesario conseguir elevar la temperatura tanto como sea necesario, con respecto al termoplástico utilizado, y para ello; se ha optado como mejor elección el arreglo de un sistema de resistencias eléctricas, tal como se muestra en la figura 2.4.

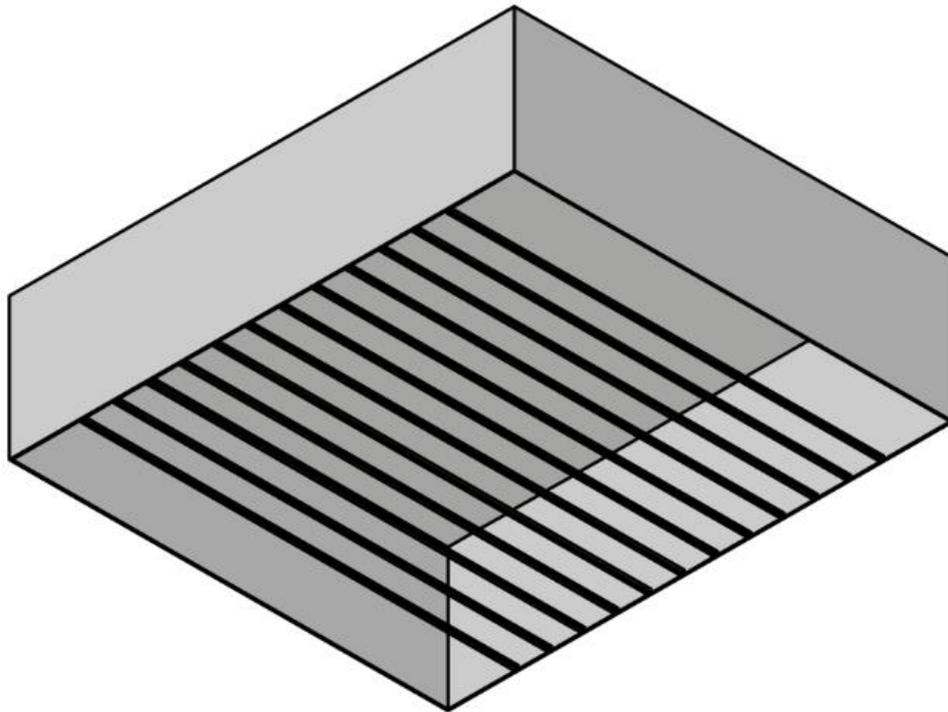


Figura 2.4: Sistema de resistencias eléctricas, distribuidas uniformemente en paralelo.
[Fuente: Elaboración propia]

El sistema mostrado en la figura 2.4, el cual es básicamente una idealización; en la realidad se muestra como se aprecia en la figura 2.7, la cual representa el sistema implementado para el actual trabajo.

El calor que necesita ser disipado para que la lámina alcance una temperatura de formado, puede ser modelado mediante la ecuación 2.1

$$Q_L = V_L * \rho_L * (C_{pL} * \Delta T + h_{if}) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$\Delta T = T_b - T_a \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$Q_L = \frac{m_L * C_{pL} * \Delta T}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Q_L [kJ]: calor removido de la lámina para lograr el termoformado

V_L [m^3]: volumen de la lámina

ρ_L [$\frac{kg}{m^3}$]: densidad del material de la lámina

C_{pL} [$\frac{kJ}{kg \cdot K}$]: calor específico del material de la lámina

ΔT [K]: diferencia entre la temperatura ambiente y la que se desea alcanzar para termoformar la lámina

T_b : temperatura de formado

T_a : temperatura ambiente

h_{if} [$\frac{kJ}{kg}$]: Calor latente de fusión del material de la lámina

m_L [kg]: masa en kg de la lámina

Δt [s]: tiempo de exposición de la lámina a los calentadores

Igualando las ecuaciones 2.1 y 2.3, se obtiene el tiempo de calentamiento al cual la lámina debe ser expuesto, de manera que:

$$\Delta t = \frac{C_{pL} * \Delta T}{C_{pL} * \Delta T + h_{if}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

El valor de Q_L obtenido en la ecuación ya se con la ecuación 2.1 o la 2.3, hace referencia a la cantidad de calor que se debe retirar para alcanzar la temperatura de formado en la lámina termoplástica, depende también de factores como la distancia entre la lámina y el arreglos de resistencias; y como la interacción entre estas es sin contacto, es decir; mediante radiación, para calcular la cantidad de calor real necesaria para ablandar la lámina se deben considerar factores tales como las áreas interactuantes y la distancias entre ellas.

En a la que se le removerá calor será de $520mm \times 520mm$, y la expresión para encontrar esta cantidad de energía, estaría entonces dada por la ecuación 2.5,

$$Q_{12} = A * F * \sigma * (T_{resistencias}^4 - T_{formado}^4) \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Q_{12} : Calor emitido desde las resistencias hasta la lámina termoplástica

A : área de la lámina paralela a las resistencias

F : factor de visión entre las resistencias y la lámina termoplástica

σ : constante de Stefan Boltzman

$T_{resistencias}^4$: temperatura de las resistencias eléctricas

$T_{formado}^4$: temperatura de formado de las láminas termoplásticas

El factor de visión F , se lo puede obtener a partir de la gráfica de la figura 2.5, donde básicamente se deben conocer las dimensiones de la lámina (i), el área de calentamiento (j) y la separación entre ambas áreas (L).

Por lo que se sostiene que, las ecuaciones 2.1 o 2.3 pueden, sin problema trabajarse con el valor obtenido para Q_L con la ecuación 2.5, se tiene entonces que:

$$Q_L = Q_{12}$$

Ecuación 2.6

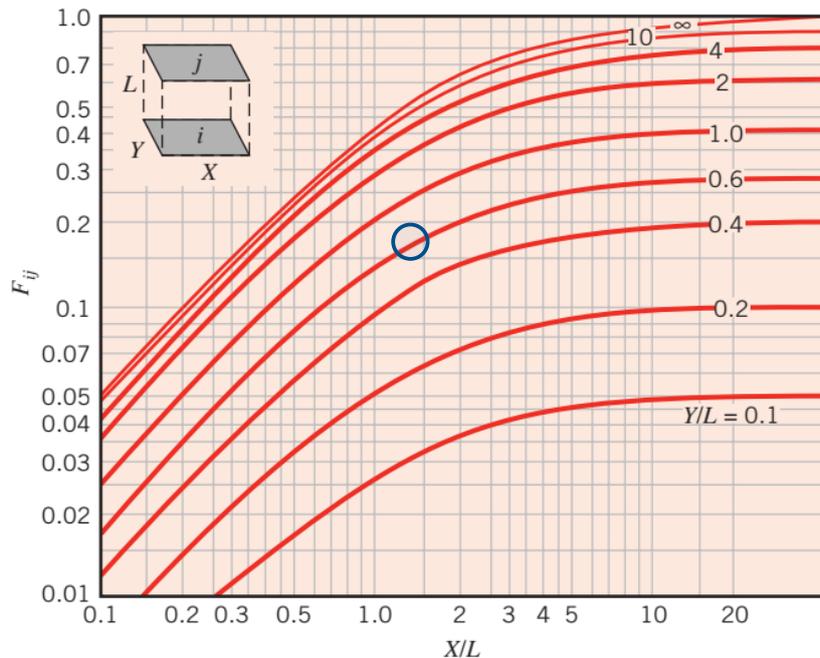


Figura 2.5: Factor de vista para áreas planas y paralelas. [Fuente: (Incropera & Dewit, 2011)]

La elección del parámetro F para nuestro caso donde

$$X = Y = 0.520 \text{ m}$$

$$L \cong 0.05 \text{ m}$$

Entonces;

$$\frac{X}{L} = 10.4$$

$$\frac{Y}{L} = 110.4$$

$$F_{ij} = 0.9$$

Por lo tanto;

Tabla 2.15: Características dimensionales de las láminas de HDPE y HIPS. [Fuente: Elaboración propia].

Material	Densidad [kg/m ³]	Ancho X [mm]	Fondo Y [mm]	Espesor W [mm]	Área A [mm ²]	Volumen V [mm ³]	Masa m [kg]
HPDE	1.03E+03	520	520	1.5	270400	405600	0.000406
HIPS	960	520	520	1.5	270400	405600	0.000406

Para determinar el tiempo de calentamiento necesario para alcanzar la temperatura de termoformado, se procede a combinar las ecuaciones 2.3 y 2.5 el tiempo quedaría determinado por la ecuación 2.10.

$$A * F * \sigma * (T_{resistencias}^4 - T_{formado}^4) = \frac{m_L * Cp_L * \Delta T}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$\Delta t = \frac{m_L * Cp_L * (T_{formado} - T_{ambiente})}{A * F * \sigma * (T_{resistencias}^4 - T_{formado}^4)} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

$$\Delta t = \frac{\rho_L * V_L * Cp_L * (T_{formado} - T_{ambiente})}{A * F * \sigma * (T_{resistencias}^4 - T_{formado}^4)} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$\Delta t = \frac{\rho_L * W * Cp_L * (T_{formado} - T_{ambiente})}{F * \sigma * (T_{resistencias}^4 - T_{formado}^4)} \quad \text{Ecuación 2.10}$$



Figura 2.6: Máquina completa.
[Fuente: Elaboración propia]



Figura 2.7: sistema de calentamiento. [Fuente: Elaboración propia]

Estos valores; Q_{12} corresponderían a la potencia máxima que el sistema de resistencias deberá generar, si lo que se quiere es realizar justamente el ablandamiento de las láminas hasta la temperatura de formado.

2.11 Potencia del sistema de resistencias

Las resistencias elegidas serán:

- 4 CRB de 1000 W y 220 V (las 5 más grandes de la figura 12)
- 1 CRB con termocupla tipo K de 1000 W y 220 V
- 6 CRB de 200 W y 230 V

2.12 Diseño del sistema de vacío

Este sistema básicamente cumple la función de succionar el aire presente entre la lámina y el molde al momento de realizar el termoformado. EL arreglo que se utilizará es básicamente el presentado en la figura 2.8, además de otros equipos de importancia tales como el tanque de acumulación de vacío, manómetros y válvulas.

Volúmenes de importancia para calcular la capacidad del sistema de vacío:

- Volumen del objeto a ser deformado
- Volumen de la mesa de vacío
- Volumen de las mangueras neumáticas o tubos entre la mesa de vacío y la bomba

El sistema a utilizarse se presenta en la figura 2.8, y el de la mesa de succión en la figura 2.10.

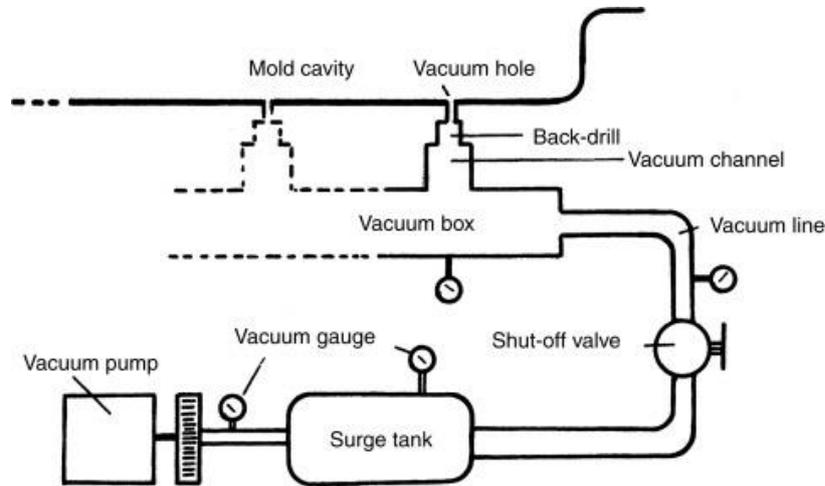


Figura 2.8: Sistema de vacío. [Fuente: (Throne, 2017)]

Un factor de mucha importancia a ser considerado para un correcto diseño del sistema de vacío, y su posterior selección de la respectiva bomba, corresponde a las dimensiones máximas que debe tener el molde, dado por la ecuación 11.

$$V_{molde} = L_{molde} * W_{molde} * H_{molde} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$V_{mesa} = L_{mesa} * W_{mesa} * H_{mesa} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

$$V_{manguera} = L_{manguera} * \pi * \frac{D_{in}^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$$V_{total} = V_{molde} + V_{mesa} + V_{manguera} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Los subíndices de cada término de las ecuaciones 2.11 a la 2.13 indican el volumen del objeto en cuestión. Y V_{total} se refiere al total de aire que debe ser desplazado para formar el vacío.

La mesa sobre la cual se asienta el molde, sirve como medio para succionar el aire que queda entre la lámina y el molde al momento de bajar la lámina en estado ahulado, es decir; cerca de la temperatura de revenido del termoplástico.



Figura 2.9: Sistema de vacío real.
[Fuente: Elaboración propia]

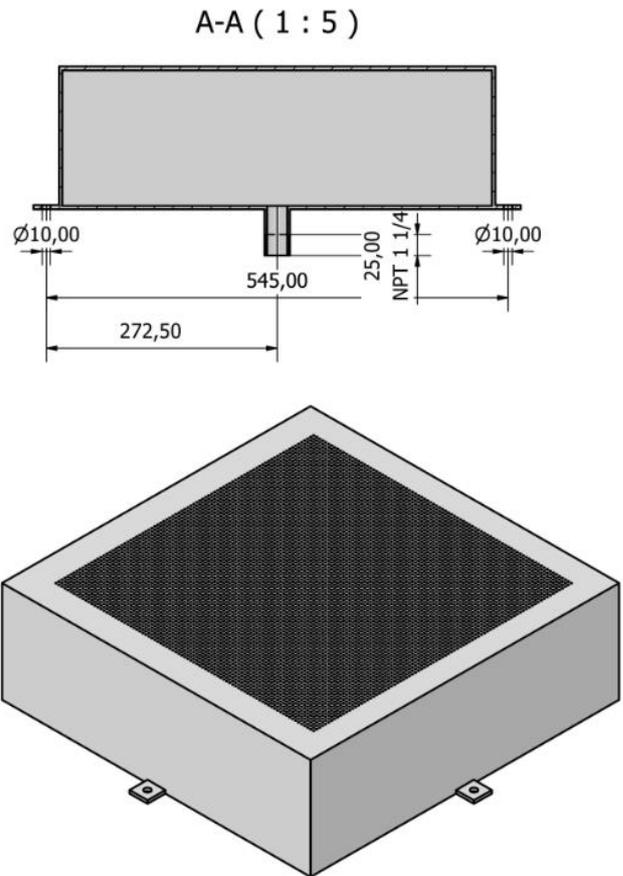


Figura 2.10: Forma básica de la mesa de vacío. [Fuente: Elaboración propia.]

El factor más importante en este proceso de diseño de la bomba de vacío corresponde a la capacidad de bombeo (S_p) que se requiere, el cual puede ser obtenido mediante la ecuación 2.15.

$$S_p = \frac{V_{total}}{t} * abs \left(\ln \left(\frac{P_{atm}}{P_{termoformado}} \right) \right) \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Donde:

t : tiempo de aplicación de succión

P_{atm} : presión atmosférica

$P_{termoformado}$: presión de termoformado o presión de vacío absoluta

Se recomienda que la capacidad del tanque (V_{tanque}) para acumular vacío sea de aproximadamente 2.5 veces el volumen de aire que tiene que desplazarse (Plastiglas, 2020), el cual está representado por la ecuación 14, de manera que:

$$V_{tanque} = 2.5 * V_{total} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Otro factor que no puede pasar desapercibido, es el la relación de áreas, el cual debe ser aproximadamente 3 (Multifab Manufacturing, 2018), el cual está dado por la ecuación 17.

$$R_a = \frac{2LH+2WH+LW}{LW} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

2.13 Mecanismo de movimiento de la lámina

Le movimiento de la lámina se realizará mediante un mecanismo de servomotores, los cuales le permitirán al marco que contiene la lámina subir hacia el sistema de resistencias y bajar hasta el molde.

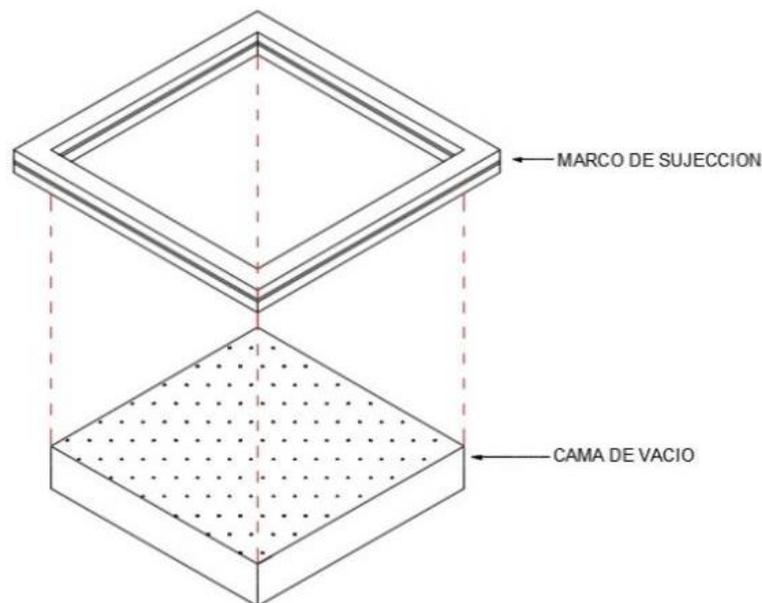


Figura 2.11. Mecanismo de sujeción de la lámina. [Fuente: (Calle & sánchez, 2017)]

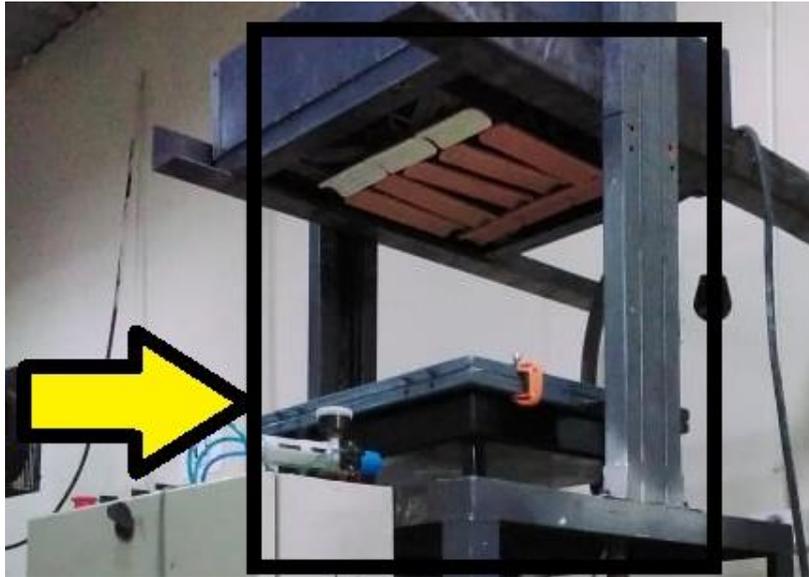


Figura 2.12: Marco de sujeción de la lámina. [Fuente: elaboración propia]

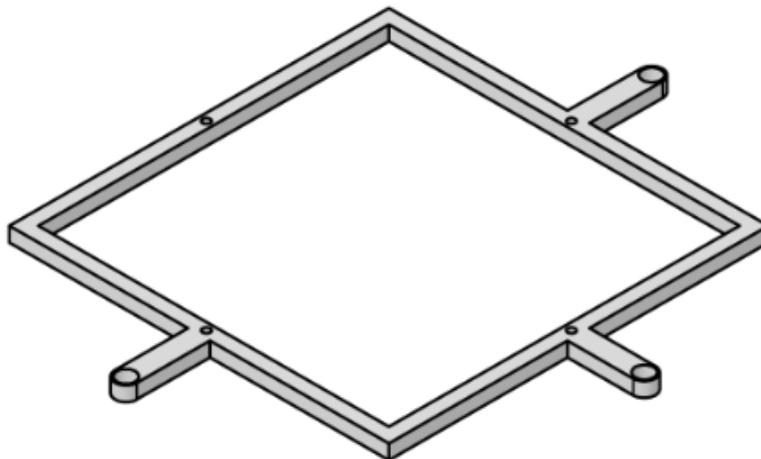


Figura 2.13: Marco de sujeción de la lámina, vista en CAD. [Fuente: elaboración propia]

La elevación o descenso del marco se realiza mediante transmisión de potencia usando air comprimido para subir y bajar el sistema, es decir; se obedece al funcionamiento de un pistón neumático. Ver figura 2.14.

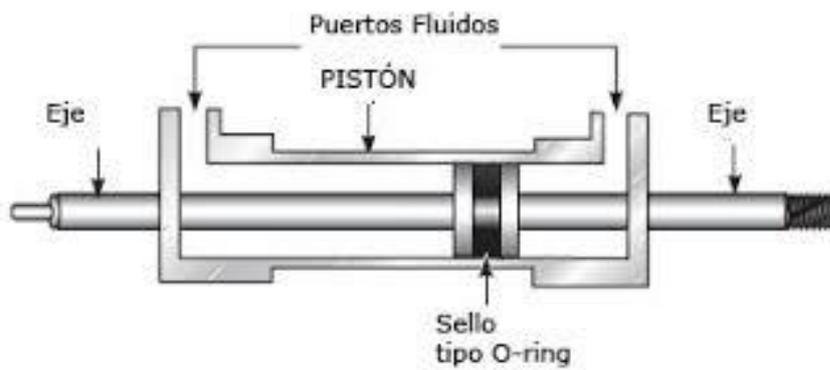


Figura 2.14: Sistema pistón neumático del mecanismo de transmisión de potencia para subir y bajar el marco porta lámina. [Fuente: (Neuma & Winkel, 2019)]

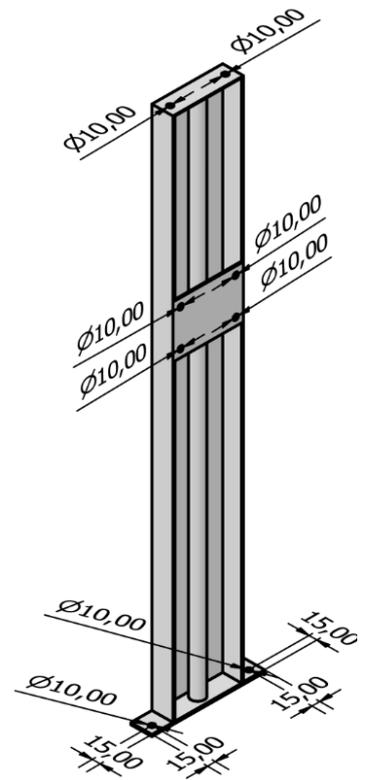


Figura 2.15: Sistema neumático. Vista en CAD. [Fuente: elaboración propia]

2.14 Estructura de la máquina



Figura 2.16. Máquina. Vista isométrica. Foto real. [Fuente: elaboración propia]

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS

3.1 Resultados del sistema de calentamiento

Para llegar a las condiciones planteadas en el capítulo 2, para poder tratar las láminas, ya sean de HDPE o de HIPS, se ha determinado que:

$F = 0.9$, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K}$, $T_{resistencias} = 600^\circ C = 873.15 K$ los resultados para la ecuación 2.2, y tomando las temperaturas medias de formado de la tabla 2.14, los valores de calor emitido máximo (Q_{12}) quedarían como:

Tabla 3.1: Valores de calor máximo emitido por el sistema de calentamiento. [Fuente: elaboración propia].

<i>Material</i>	<i>Área A</i>	<i>T_{formado}</i>	<i>Q_L = Q₁₂</i>	
	[m ²]	[°C]	[W]	[kW]
HDPE	0.27	295.00	1683.79	1.68
HIPS	0.27	300.00	1676.52	1.68

La tabla 11 indica los tiempos que deben ser considerados para calentar las láminas, dependiendo del tipo de material con el que se esté trabajando. Se proyecta hasta dos decimales, en caso de contarse con equipos de alta precisión, sin embargo; esto podría variar para efectos de laboratorio, donde la manipulación del control que permite subir y bajar el marco que contiene la lámina termoplástica sería básicamente manual. Se recomienda aproximar al entero mayor más cercano. Se resalta además, las láminas de 1.5 mm; que son aquellas con las que se realizaron las primeras pruebas.

Tabla 3.2: Tiempos de exposición de la lámina al arreglo de resistencias, con espesores que varían entre 0.5mm y 5mm. [Fuente: elaboración propia].

ESPESOR [mm]	Tiempo de Calentamiento [s]	
	HDPE	HIPS
0.5	9.64	10.44
1	19.27	20.88
1.5	28.91	31.32
2	38.54	41.76
2.5	48.18	52.20

3	57.82	62.63
3.5	67.45	73.07
4	77.09	83.51
4.5	86.72	93.95
5	96.36	104.39

3.2 Resultados del sistema de vacío

El sistema de vacío es aquel que permite generar vacío para activar componentes mecánicos, es decir; darle movimiento. En este caso, el sistema de vacío se utilizará en dos secciones.

1. Vacío para activar el funcionamiento del sistema sube y baja del marco porta lámina.
2. Vacío para succionar el aire que queda presente entre la lámina y el molde al momento de realizar el termoformado.

3.2.1 Selección de la bomba de vacío

El término vacío se refiere a la ausencia de aire en un volumen de control cerrado, dicha ausencia disminuye súbitamente la presión interna y produce la succión en el sistema.

Para la selección de un generador de vacío es necesario obtener el volumen total de aire que existe en el sistema, entre los cuales se tiene que, conociendo la dimensión del molde sobre el cual se va a termoformar:

Se debe tener la certeza de que se seleccionará la bomba correcta, y que ésta cumplirá fielmente la succión requerida bajo las condiciones planteadas en el capítulo 2, se acude a calcular la relación de áreas, mediante la ecuación 2.17, el cual debe ser menor o igual que 3.

$$R_a = \frac{2LH + 2WH + LW}{LW} = \frac{2 * 520 * 100 + 2 * 520 * 100 + 520 * 250}{520 * 520} = 1.25$$

Con lo cual se cumple el criterio de formabilidad planteado por (Multifab Manufacturing, 2018).

Volumen del objeto a ser termoformado, se obtiene con la ecuación 2.11, de manera que;

$$V_{molde} = 6.25 \times 10^5 \text{ mm}^3 = 0.00625 \text{ m}^3$$

Para obtener el resultado del V_{molde} , se tomó como área para la base del mismo una medida de $250\text{mm} * 250\text{mm}$ de área, incluso cuando las dimensiones máximas de la mesa para el molde y marco son de $520\text{mm} * 520\text{mm}$. Esto, para que en un futuro haya la factibilidad de que el molde sea adaptable a nuevas medidas superiores a las tomadas, pero inferiores a la máxima del marco.

La mesa de vacío es un medio fundamental para que pueda realizarse una distribución uniforme de la capacidad de succión, y sus dimensiones deben ser equivalentes a la de la lámina termoplástica, las cuales son:

$$L_{\text{mesa}} = 520\text{ mm}$$

$$W_{\text{mesa}} = 520\text{ mm}$$

$$H_{\text{mesa}} = 200\text{ mm}$$

Con lo cual;

$$V_{\text{mesa}} = 5.41 \times 10^7 \text{ mm}^3 = 0.0541 \text{ m}^3$$

El sistema de vacío, la mesa de vacío y el tanque acumulador, están conectados mediante tuberías de $\frac{1}{2}$ in, c hay una aproximado de 3 m de tuberías, con lo cual el volumen de aire encerrado en estos se puede obtener con la ecuación 2.13, de manera que:

$$V_{\text{manguera o tubos}} = 3.80 \times 10^5 \text{ mm}^3 = 0.00038 \text{ m}^3$$

De esta manera, se obtiene que el volumen total a ser removido es:

$$V_{\text{total}} = 6.07 \times 10^7 \text{ mm}^3 = 0.0607 \text{ m}^3$$

La caracterización de la bomba de vacío se realiza mediante el cálculo de la capacidad de bombeo S_p en la ecuación 2.15, donde se fija: un tiempo t de 5 segundos, presión atmosférica $P_{\text{atm}} = 101325 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$ y presión de trabajo $P_{\text{termoformado}} = 105000 \text{ Pa} = 1.48 \text{ atm}$

$$S_p = 3.6 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.72 \text{ CFM}$$

Como se puede observar, la capacidad de bombeo es mínima; lo cual es razonable debido a las pocas exigencias que se tiene. Se opta por una bomba de paletas rotativas

RV8 (ver manual de datos técnicos en apéndices), con una capacidad de bombeo de 1.5 CFM, tal como se muestra a continuación y en la figura 20:

Tipo de bomba: RV8

Descripción del motor: 200-230/380-460V, 50/60Hz, trifásica



Figura 3.1: Bomba de vacío, modelo RV8 de 1.5CFM. [Fuente: (EquipNet, 2022)]

3.2.2 Selección del tanque acumulador de vacío

Para darle mayor potencia para actuar de manera espontánea (pocos segundos: 5 aproximadamente), se requiere que la bomba de vacío cuente con una ayuda extra a su propia capacidad, para lo cual se hace uso de una tanque para acumular vacío.

Y además de la ecuación 2.16 se obtiene que la capacidad del tanque de vacío necesario es de $0.15 m^3$

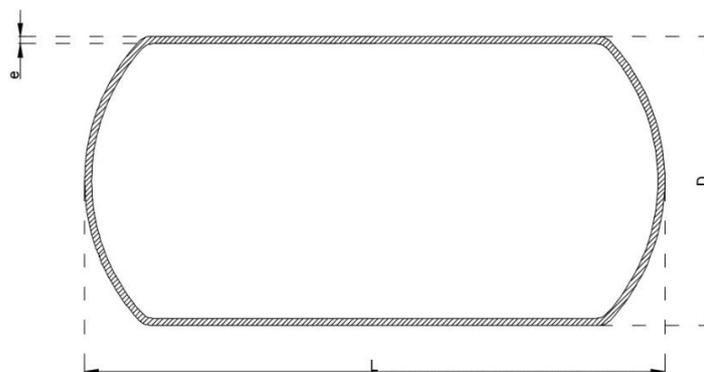


Figura 3.2: Modelo teórico del tanque para acumular vacío. [Fuente: (Calle & Sánchez, 2017)]

Se opta entonces por implementar un tanque acumulador de vacío con una capacidad de 20 L, el cual se muestra en la figura 22.



Figura 3.3: Tanque de vacío para el mecanismo de aire comprimido. [Fuente: FIPA]

Tabla 3.3: Especificaciones del tanque de acumulación de vacío.

Capacidad	20 L
Presión	$\leq 1.25MPa$ (12 kg)

3.2.3 Descripción del sistema de vacío

El sistema utilizado en este proyecto para satisfacer la demanda de vacío se compone principalmente de la bomba una bomba de vacío con su correspondiente tanque acumulador, válvulas y tuberías. Se resumen los elementos más importantes presentes en el sistema utilizado en la máquina de termoformado.

- Bomba de vacío RV8 de 1.5 CFM. La cual es la principal encargada de generar el vacío y de manera temporal también sustraer el aire del tanque de acumulación hasta máximo 30inHg o -100 kPa
- Tanque acumulador de vacío. Almacenamiento de vacío para utilizarlo como mecanismo de respuesta a una succión espontánea, cuya capacidad volumétrica es de 20 L, y puede soportar una presión de vacío máxima de hasta 1.5 MPa, teniendo en cuenta que se va a utilizar como máximo 0.7 MPa.
- Mesa de Vacío. Es básicamente el medio que permite que se realice la succión del aire presente entre el molde y la lámina termoplástica en estado ahulado, sobre la cual se inyecta presión negativa. Sus dimensiones principales son: 520mm ancho x 520mm fondo x 200mm alto.

- Válvula de dos vías y dos posiciones normalmente cerrada. La cual permite el paso de aire a la mesa de vacío. Pueden también utilizarse válvulas de bolas sencillas.
- Vacuómetro. Este se utiliza como medio visual de control para que operador de la maquina controle la cantidad de vacío en el tanque acumulador, mediante el encendido y apagado de la bomba.
- Filtros. Utilizado para proteger al equipo de posibles impurezas que puedan dar el equipo, además de evitar que se genera alguna obstrucción no deseada.

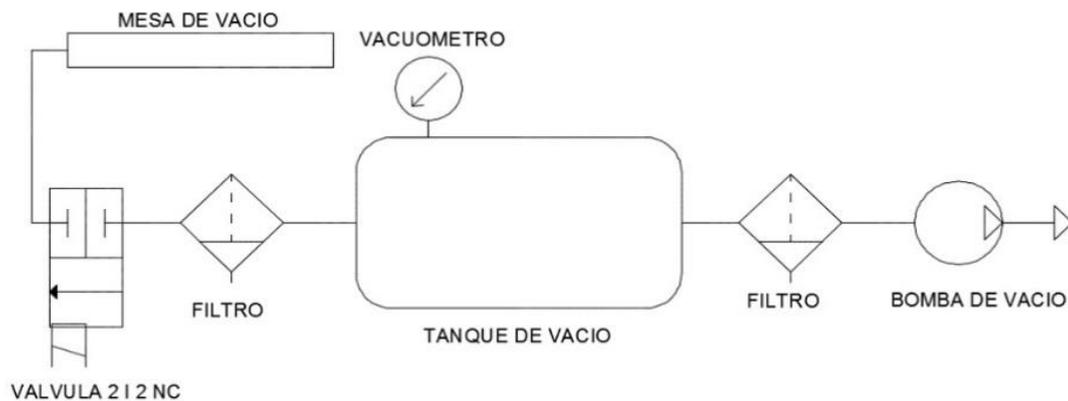


Figura 3.4: Diagrama utilizado para el sistema de vacío para realizar la succión de aire en el molde. [Fuente: (Calle & sánchez, 2017)]

3.3 Resultados del mecanismo del movimiento de la lámina

Las dimensiones finales del marco de la lámina son: $520\text{ mm} \times 520\text{ mm} \times 30\text{ mm}$. Con tubos de 30 mm formando el marco, se tiene entonces que la superficie neta máxima para termoformado es de $490\text{ mm} \times 490\text{ mm}$

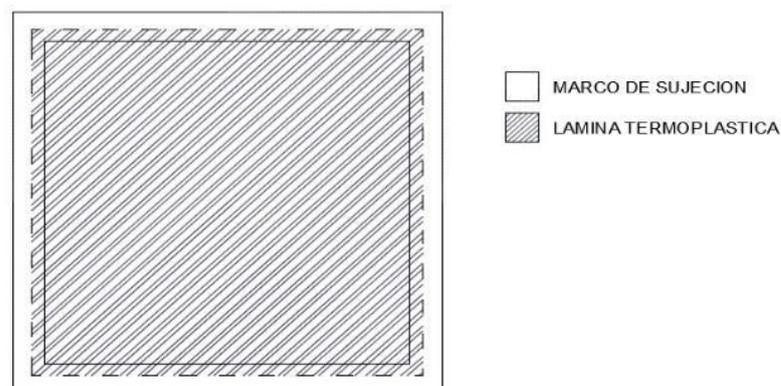


Figura 3.5: Marco de sujeción de la lámina termoplástica. [Fuente: (Calle & sánchez, 2017)]

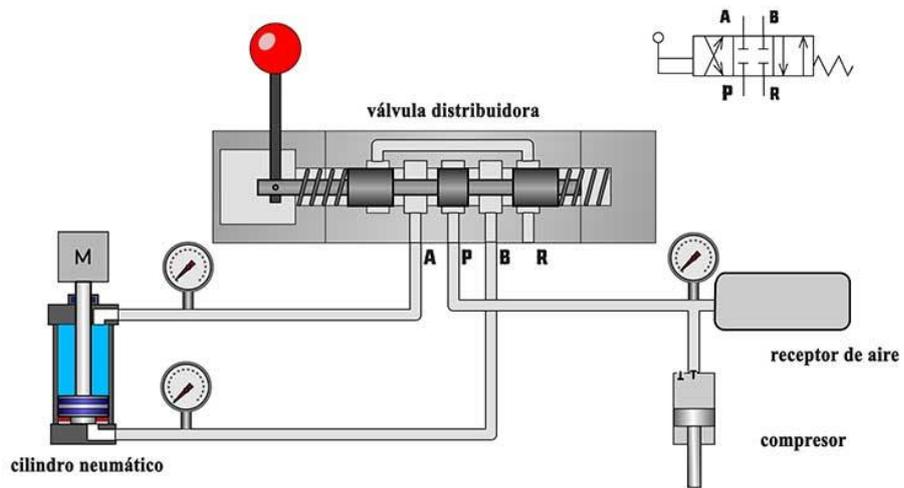


Figura 3.6: Esquema del sistema de cilindros neumáticos para subir y bajar el marco de sujeción de la lámina. [Fuente: (Calculation, 2022)]



a)



b)

Figura 3.7: a) Tanque compresor del laboratorio de termoplásticos. b) Válvulas neumáticas. [Fuente: Elaboración propia]

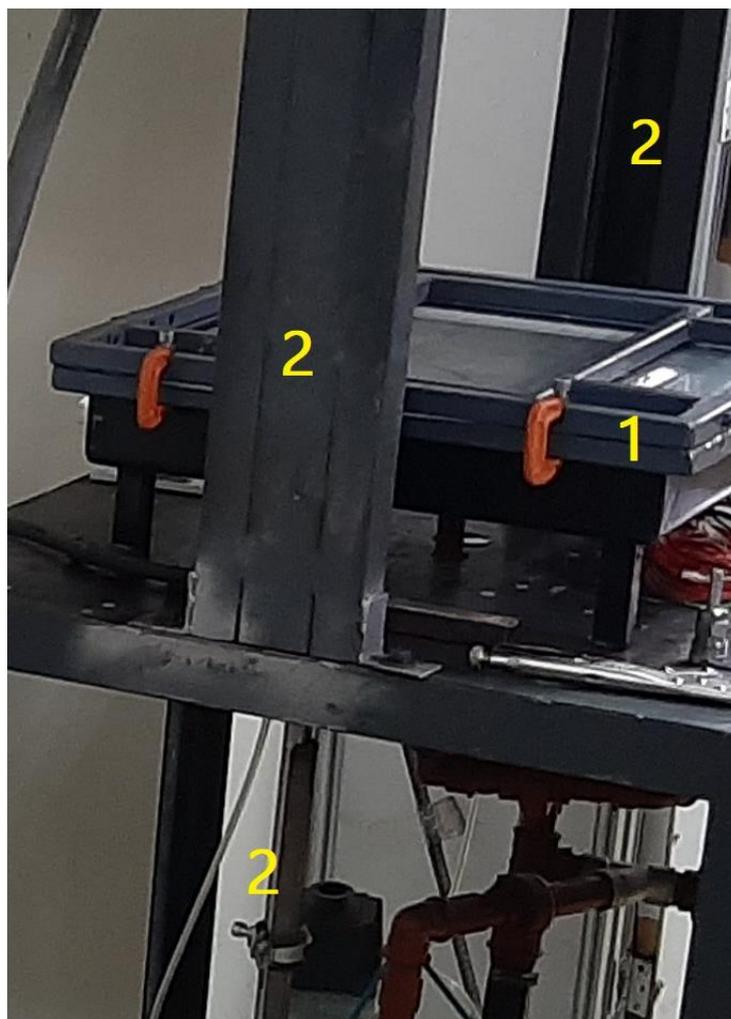


Figura 3.8: Parte superior de la máquina. Se aprecia el marco (1) y cilindros neumáticos (2). [Fuente: Elaboración propia]

3.4 Análisis de costos

3.4.1 Costos directos

Para la construcción de la máquina de termoformado abarcaron los siguientes costos, los cuales engloban tanto los costos de producción como los de ejecución del trabajo.

- Equipos principales: resistencias, bomba de vacío y tanque acumulador.
- Materiales de construcción
- Mano de obra

La estimación inicial de los costos está basada en los valores generados en la tesis presentada en la FIMCP para 2017, con el título que realizó para “Diseño de una máquina

de termoformado para laboratorio”. (Calle & sánchez, 2017) Estos costos, se detallan a continuación:

Tabla 3.4. Estimación de costos [Fuente: Proyecto para materia integradora presentada bajo el “Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio” [Fuente: Repositorio FIMCP]

Costos	Cantidad (USD)
Costos Directos	1211.76
Costos Indirectos	666.46
Costos Totales	1878.22

Los valores presentados en la tabla 12 reflejan una estimación solamente. Sin embargo, es casi innegable indicar que la fabricación real de la máquina de termoformado, generará valores distintos, aunque similares. Actualmente se dispone de un fondo de 4000 USD, el cual ha sido adquirido mediante gestiones del laboratorio de plásticos de la FIMCP y ESPOL TECH. Los costos reales del proyecto se reflejan en el capítulo 3, e indican las justificaciones para el valor presentado en el “resumen”, al inicio de este documento, el cual es de \$3781.01 USD.

Tabla 3.5: Equipos principales de la máquina de termoformado. [Fuente: elaboración propia]

Equipo	Cantidad (USD)	Valor Unitario (USD)	Valor Total (USD)
Resistencia Infrarroja De Cerámica Modelo Crb00031, Color Blanco, 1000w 220/240v	8	49	392
Resistencia Infrarroja De Cerámica Modelo Crb10033, Color Rosa/Gris, Con Termopar Tipo K Integrado 1000w 220/240v	3	79	237
Bomba de vacío de paletas rotativas de aceite RV8. EDWARDS. (usada)	1	500	500
Tanque de compresor de aire horizontal de 20 litros	1	106	106
Subtotal			1235
IVA (12%)			148.2
Valor total			1383.2

Tabla 3.6: Materiales de construcción. [Fuente: elaboración propia]

Material	Cantidad	Valor Unitario (USD)	Valor Total (USD)
Perfil angular 40x40 (por metro)	16.00	6.38	102.08
Perfil angular 50x50 (por metro)	2.00	10.72	21.44
Tubo redondo de acero inoxidable ASTM A240 1/2 in	2.00	10.48	20.96
Tubo cuadrado de acero inoxidable ASTM A241 3/4 in	4.00	19.13	76.52
Plancha de acero laminada en frío 1mm x 1000 mm x 3000 mm	1.00	30.99	30.99
Filtro regulador de presión Máx. 16bar/230 psi/1.6 MPa máx. 60°C/140°F	2.00	67.88	135.76
Válvula de palanca de aire neumática de 5 vías con válvula de solenoide de 2 posiciones	1.00	12.99	12.99
Manguera hidráulica PU 6mm	6.00	2.08	12.49
Racor codo 6mm	5.00	1.46	7.30
Vacuómetro 100 kPa	2.00	25.30	50.60
Manguera sellada 1 1/2 in	5.00	6.48	32.40
Caja de paso eléctrico 600x400x200	1.00	63.85	63.85
Codo roscable PVC 1/2 in	10.00	0.49	4.90
Unión roscable PVC 1/2 in	10.00	0.58	5.80
Válvula de bola NPT 1/2 in	3.00	20.99	62.97
Extensión eléctrica 220V x 5 m	1.00	32.35	32.35
Cable 12 AWG	25.00	0.63	15.75
Kit de sello de cilindro neumático	2.00	67.28	134.56
Electrodos AWS E6011 [kg]	1.00	4.30	4.30
Thinner Galón	1.00		0.00
Pintura acrílica galón	1.00	31.86	31.86
Brocha 2 in	3.00	1.62	4.86
Guaípe kilo	1.00	0.70	0.70
Prensa tipo C 3 in	4.00	3.55	14.20
Ruedas espiga con freno	4.00	17.35	69.40
Aceite para bomba de vacío [L]	1.00	22.89	22.89
Subtotal			971.92
IVA (12%)			116.63
Valor total			1088.55

Tabla 3.7. Costos de mano de obra. [Fuente: elaboración propia]

Material	Horas de trabajo	Costo hora/hombre (USD)	Valor Total (USD)
Soldador	40.00	5.00	200.00
Ayudante	30.00	3.13	93.75
Subtotal			293.75
IVA (12%)			35.25
Valor total			329.00

Tabla 3.8: Costos directos totales. [Fuente: elaboración propia]

Costos directos	Valor (USD)
Equipos principales	1383.20
Materiales de construcción	1088.55
Mano de obra	329.00
Valor total	2800.75

3.4.2 Costos indirectos

Son aquellos que surgen como resultado de la ejecución de un proyecto, y podrían variar dependiendo de la cantidad de productos o bienes generados, y por esa razón no se los mide de manera directa. En este caso, por tratarse de un proyecto casi en su totalidad aplicativo, la mano de obra y costos indirectos pueden ser muy variados; desde comprar una botella de agua para quien ejecuta la mano de obra, hasta pagar un flete para transportar la máquina ya terminada, entre otros. Por lo cual, se ha tomado en consideración un estimativo de:

- Servicios de ingeniería: 20% de los costos directos
- Insumos: 15% de los costos directos

Tabla 3.9: Costos indirectos totales. [Fuente: elaboración propia]

Tipo de costo indirecto	Valor (USD)
Servicios de Ingeniería	560.15
Insumos	420.11
Valor total	980.26

3.4.3 Costo total del proyecto

Estos incluyen tan costos directos como indirectos, ver la tabla 18.

Tabla 3.10: Costos totales del proyecto. [Fuente: elaboración propia]

Tipo de costo	Valor (USD)
Costos directos	2800.75
Costos indirectos	980.26
Valor total	3781.01

El costo final del proyecto es de \$3781.01 USD, sin embargo, debido a costos indirectos; este valor podría verse alterado, aunque no en grandes proporciones.

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Al seleccionar las láminas termoplásticas estas deben cumplir con máximo 5mm de espesor y un área de máximo 500 mm x 500 mm. Un detalle de mucha importancia a tener en cuenta es que las dimensiones del molde no deben de exceder los 20 cm de alto, de hecho, los moldes utilizados para la práctica de laboratorio en esta práctica fueron de una altura de 10 cm.

En cuanto a los moldes; siempre que existan puntas, esquinas o curvas; estas deben contener un achaflanado si son bordes y si se trata de esquinas estas deben de ser redondeadas, caso contrario esto provocará que haya mayor acumulación de concentradores de esfuerzos. De manera general, se recomienda que los moldes sean tipo cónico, y que al menos uno de sus lados sea paralelo y plano con respecto a la mesa hueca, lugar donde se ubicará el molde.

El horno diseñado para la máquina de termoformado es capaz de generar temperaturas de hasta 700°C, por lo que en teoría podría ser aplicable para el moldeo de cualquier tipo de termoplástico, cuyas temperaturas de termoformado oscilan entre 200 y 400 °C como máximo. Para esto se cuenta con un regulador de temperatura tipo Gefran 400. Los ensayos realizados para probar la máquina, se realizaron con termoplásticos de HPDE y HIPS de 1.5 mm de espesor hasta 4 mm de espesor. No obstante, la máquina puede soportar hasta láminas de 5 mm de espesor.

El sistema de aire comprimido tiene básicamente dos secciones. La primera corresponde al aire comprimido que se necesita para hacer que el sistema portador de la lámina termoplástica suba y baje; dicho aire para subir y bajar el marco se lo obtiene de la línea de aire del laboratorio de plásticos. Y el segundo corresponde al sistema que permite sustraer o succionar el aire que queda encerrado entre la lámina termoplástica, el molde y la mesa de vacío, el cual se lo realiza mediante una bomba de vacío de 1.5 CFM y un tanque de acumulación de vacío. La máquina construida tiene una capacidad de presión de vacío de hasta 30 inHg o -100KPa, y para realizar la succión de aire trabaja al 100%.

El presente proyecto integrador, además incluye una sección donde se presenta una práctica de laboratorio. La cual puede ser replicada sin ningún problema usando cualquier tipo de termoplástico. Al momento, se han realizado pruebas en HDPE e HIPE de hasta 4 mm de espesor.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar un precalentamiento de las láminas a temperaturas inferiores a las de termoformado. De hasta como máximo 100°C. Esto, de manera que se ablande la microestructura del material de manera superficial, y luego la difusión de calor sea efectuada de manera más confiable.

Para facilidad de aprendizaje y demostración de los métodos de termoformado, se recomienda a los estudiantes y docentes utilizar láminas de fómix para realizar los primeros ensayos, pues este es un material más económico y puede adaptarse con mayor facilidad a casi cualquier forma.

Se recomienda a futuros estudiantes tesistas o investigadores, implementar la automatización de la máquina. De manera que haya menos intervención humana, sin dejar de lado el objetivo principal de la máquina; el cual es servir de medio para adquirir el mayor conocimiento posible.

El área en donde se ubique la máquina debe estar bien ventilada y con salida de emergencia inmediata. Pues, este proyecto incluye máquinas que no están libres de sobrecalentarse, provocar descargas eléctricas o explosiones por sobrepresión. Y aunque esto no ha sucedido y los equipos utilizados son totalmente certificados, se recomienda utilizar todo el equipo de protección personal apropiado; gafas, mandil de mangas cortas, guantes y cabello recogido.

Al momento del diseño de la mesa de vacío, tener muy en cuenta que los huecos por donde se succiona el aire presente entre la lámina y el molde, cubran de preferencia, solo el área donde se requiere realizar la succión respectiva, pues de no hacerlo; se estaría perdiendo vacío hacia el medio ambiente, lo cual, en grande escalas o aplicaciones en cadenas de producción, sí conllevaría pérdidas de energía y por lo tanto pérdidas económicas.

BIBLIOGRAFÍA

- AquaTeknica, S. (30 de Octubre de 2020). *ENVASE Y EMBALAJE ¿Qué es el termoformado?* Recuperado el 2022, de <https://www.interempresas.net/Envase/Articulos/317483-Que-es-el-termoformado.html>
- ASME, A. S. (2012). *CODE OF ETHICS OF ENGINEERS*. Nueva York, EE.UU.: February.
- Calculation, H. (November de 2022). *¿Cómo funciona el cilindro neumático?* Obtenido de <https://www.hydraulic-calculation.com/es/article.php?ID=53>
- Calle, A., & Sánchez, M. (2017). *Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio*. Guayaquil: ESPOL.
- Edwards Vacuum. (2017). *Manual de instrucciones. Bombas de paletas rotativas*. Edwards Limited.
- EquipNet. (December de 2022). *Bomba de Vacío Edwards RV3*. Obtenido de <https://www.equipnet.com/es/bomba-de-vac%c3%ado-edwards-rv3-listid-902347/>
- Florian, J. (1996). *Practical Thermoforming Principles and Applications, second edition, revised and expanded*. Broken Sound Parkway NW: CRC Press.
- Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. United States: John Wiley & Sons, Inc.
- Jiangsu Youcheng Zhixin Mechanical And Electrical Equipment Co., L. (2022). *20 liter stainless steel horizontal air compressor tank*. Obtenido de https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-direct-sale-20-liter-stainless_1600551169795.html
- Klein, P. W. (2009). *Fundamentals of Plastic Thermoforming*. Ohio: Morgan & Claypool Publishers.
- Krix, H. (23 de Mayo de 2012). *Protoform Vacuum Forming Machine*. Obtenido de Volpin Props: <https://www.volpinprops.com/protoform-vacuum-forming-machine/>
- Multifab Manufacturing. (2018). *Thermoforming Design Guidelines*. Spokane, Washington, 99216: Multifab Corporation.
- Ningbo Niubide Automation Technology Co., L. (2022). *Airtac tipo AFR1500 AFR2000 neumática aire fuente tratamientos unidad regulador de filtro*. Obtenido de https://spanish.alibaba.com/p-detail/Airtac-1600054673859.html?spm=a2700.shop_index.86.4.7db0400auN76Lf
- Plastiglas. (2020). *Manual Técnico TERMOFORMADO*. México.
- RAING. (2022). *Diccionario Español de Ingeniería*. Obtenido de Real Academia de Ingeniería: <https://diccionario.raing.es/es>

Rosen, S. R. (2017). *Thermoforming: Improving Process Performance*. Dearborn, Michigan 48121: Society of Manufacturing Engineers.

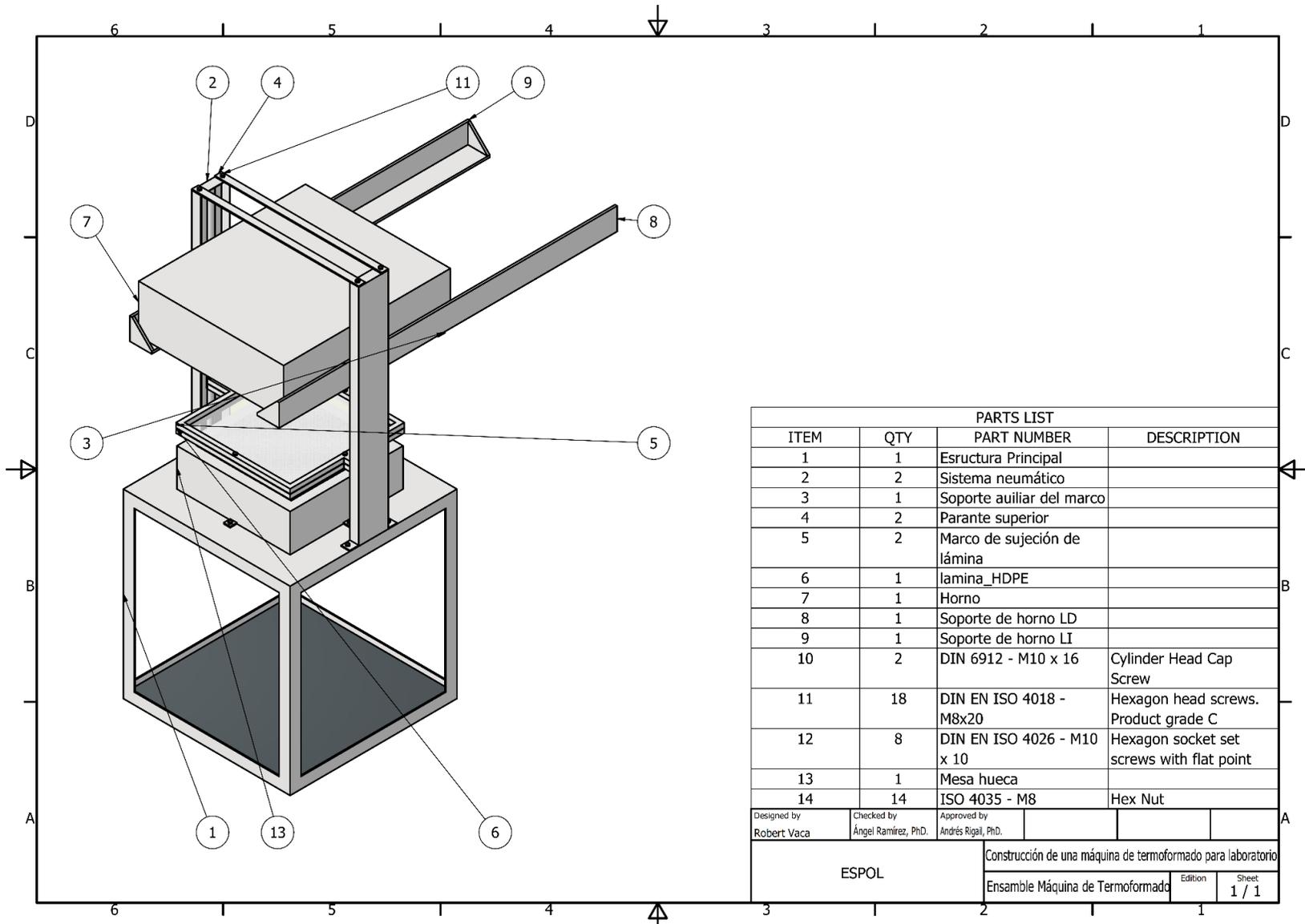
Smith, W. F. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México: The McGraw-Hill Companies, Inc. .

Tempco. (2022). *CERAMIC E-MITTERS®*. Obtenido de <https://www.tempco.com/Products/Electric-Heaters-and-Elements/Infrared-Heaters/Ceramic-E-Mitters.htm>

Throne, J. (2017). *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)*. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, United Kingdom: ScienceDirect.

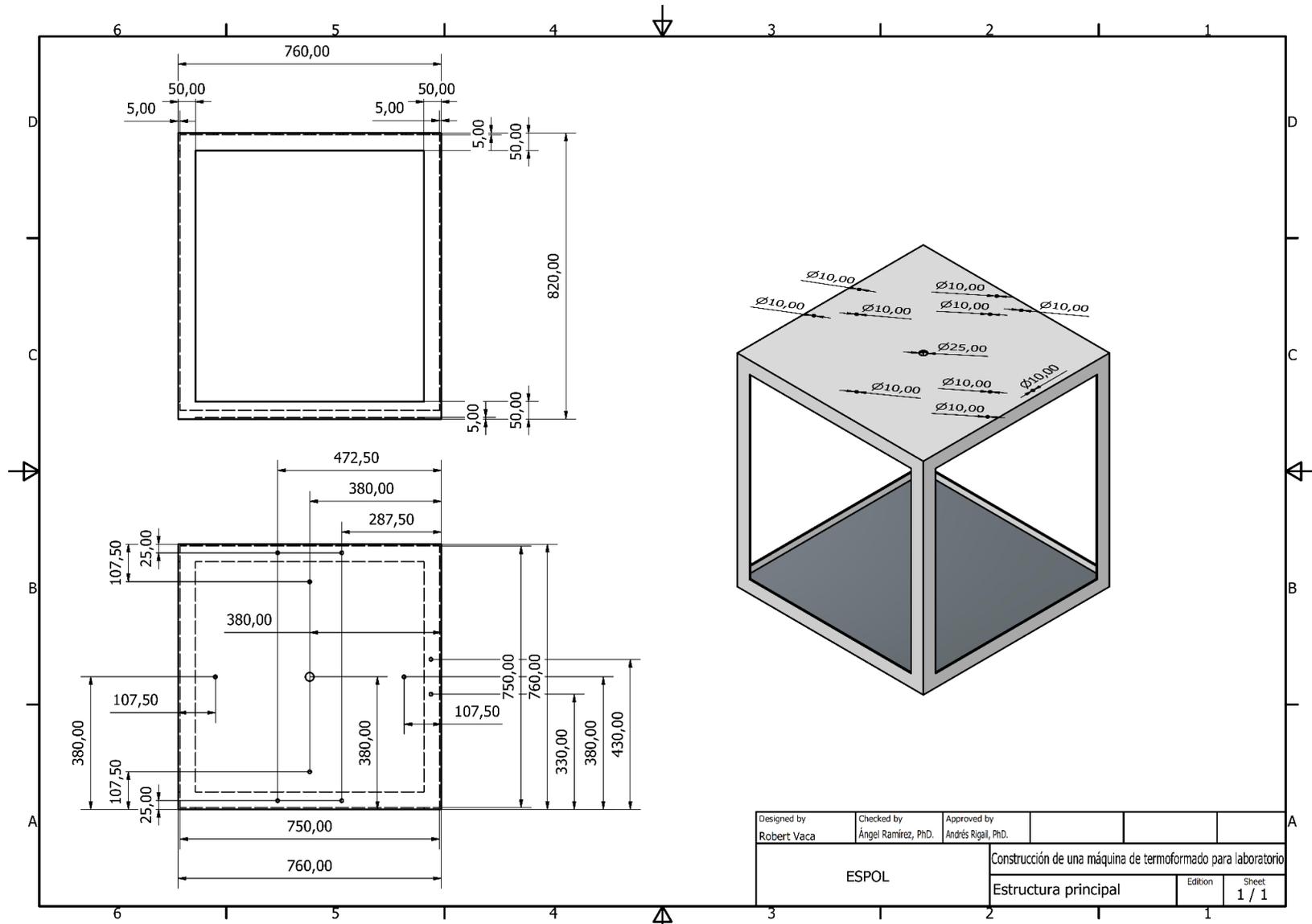
APÉNDICES

Apéndice A: Planos

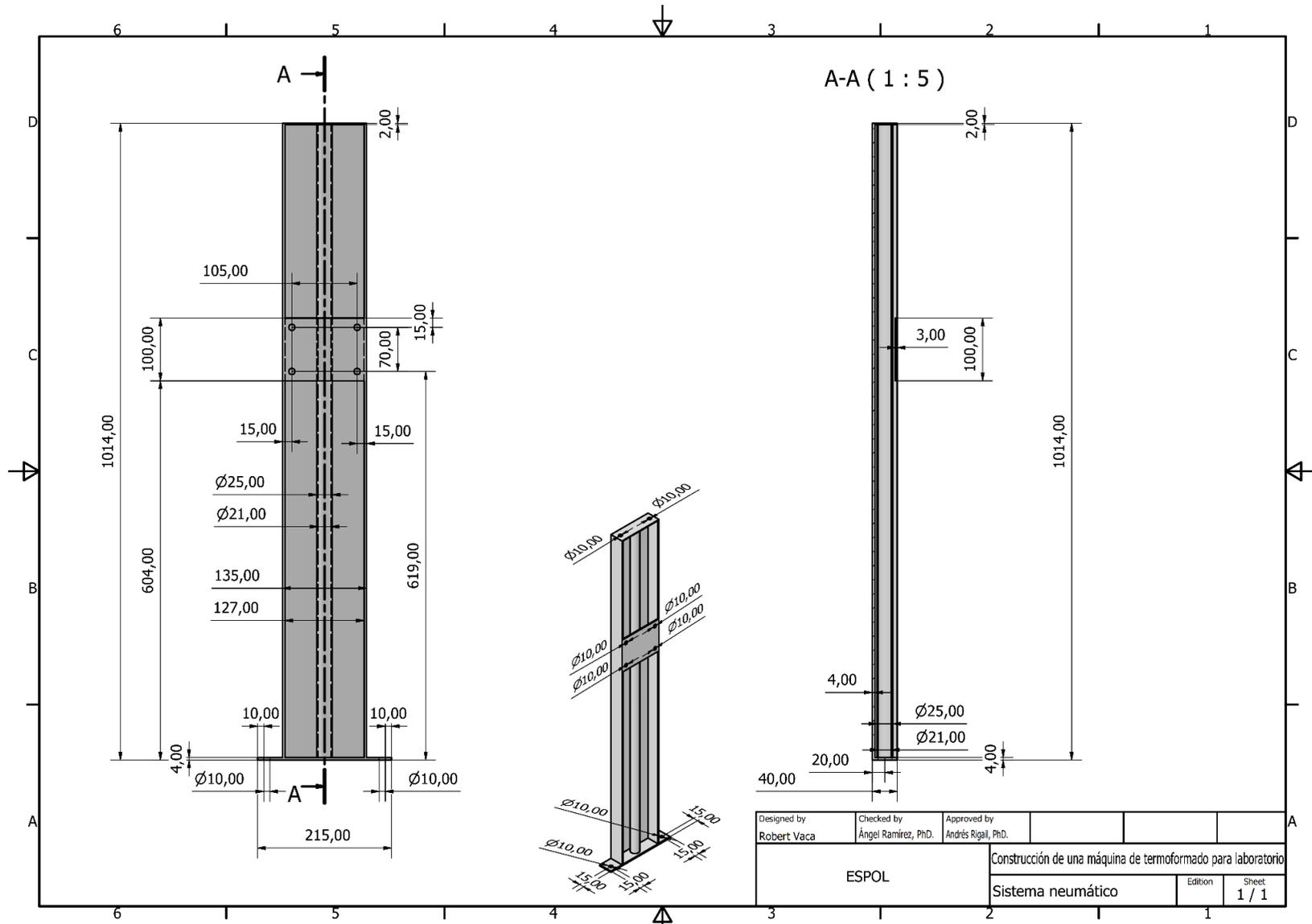


Plano 1: Ensamble de la máquina de termoformado.

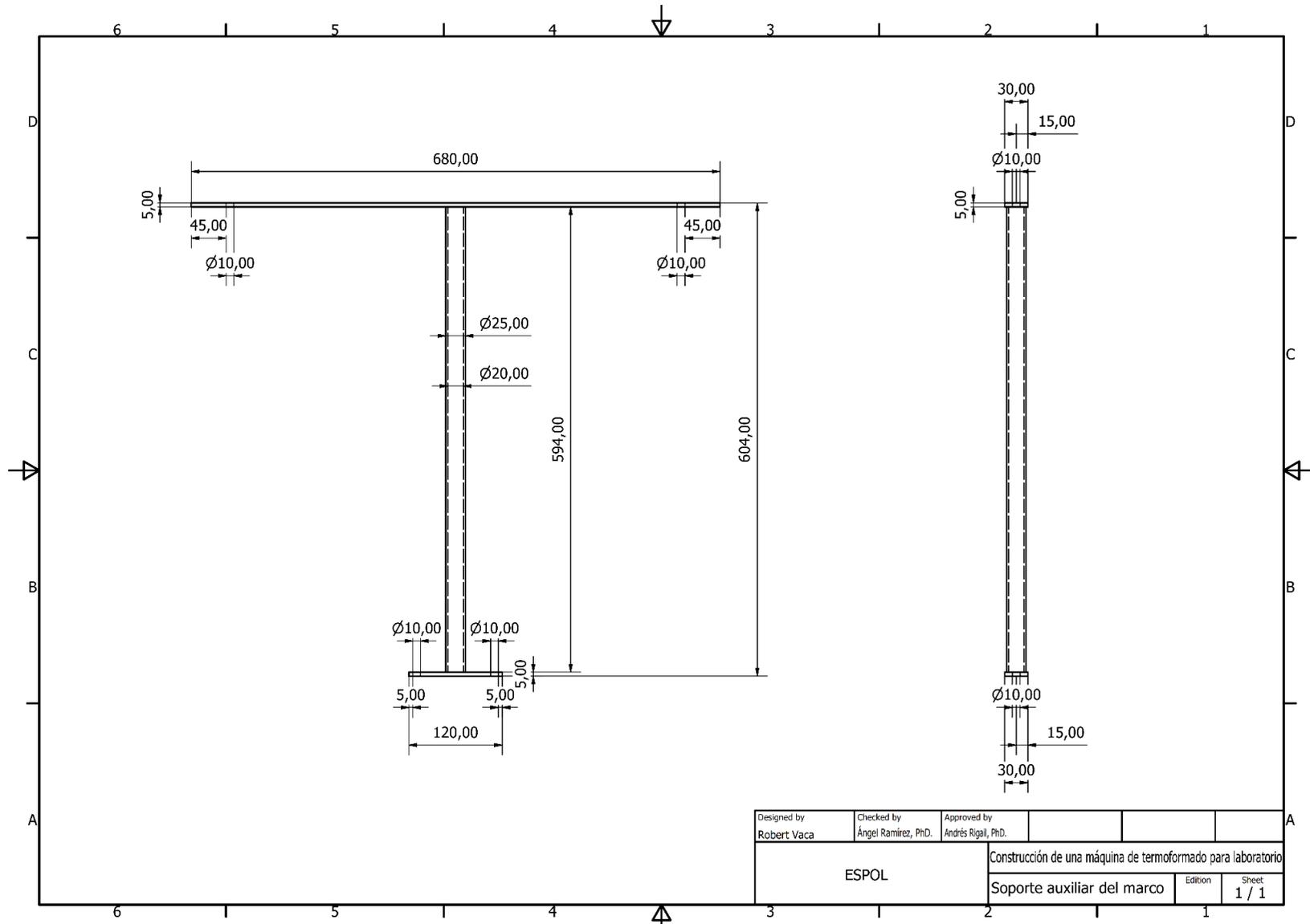
Designed by Robert Vaca	Checked by Ángel Ramírez, PhD.	Approved by Andrés Rigall, PhD.		
ESPOL		Construcción de una máquina de termoformado para laboratorio		
		Ensamble Máquina de Termoformado	Edition	Sheet 1 / 1



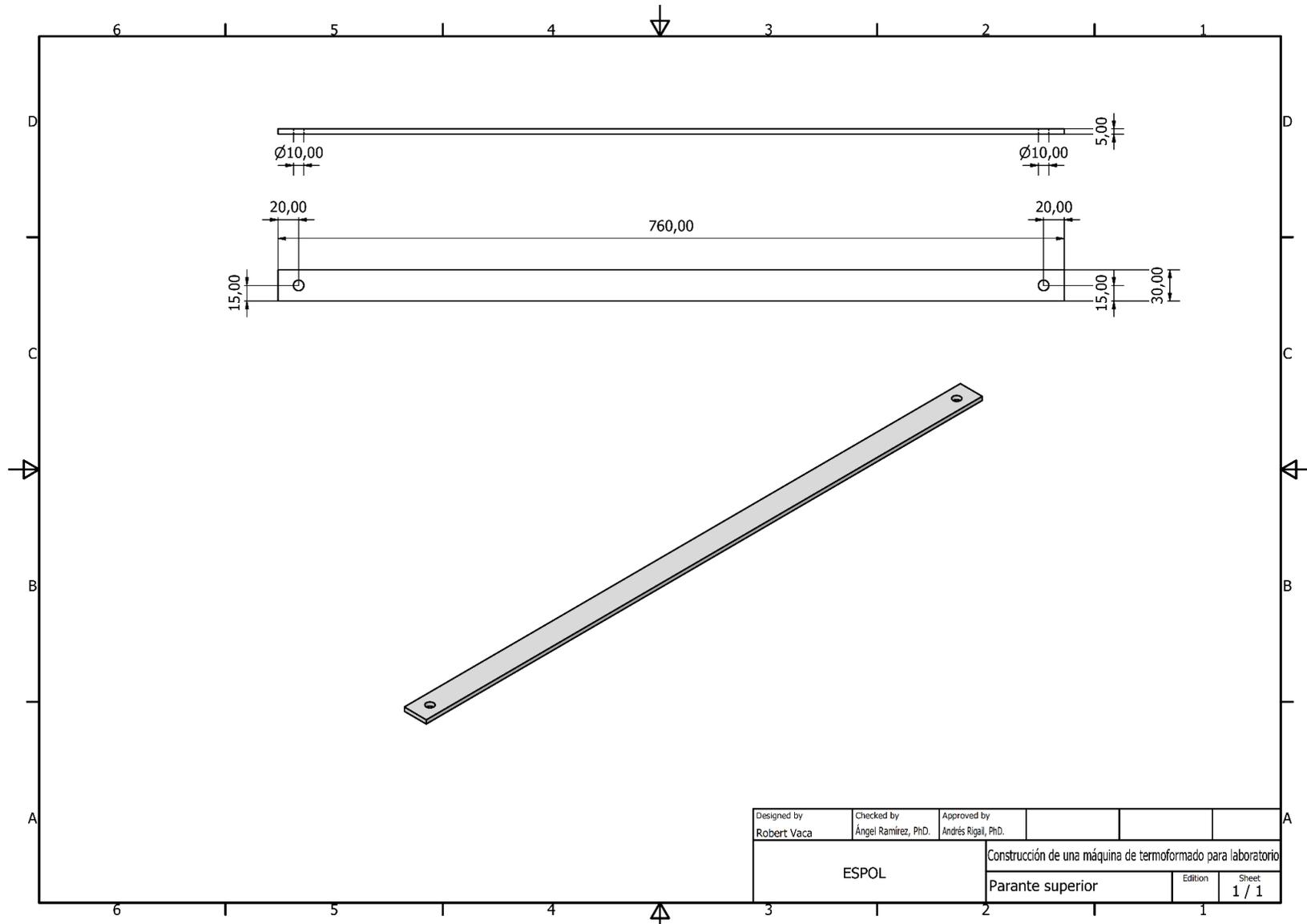
Plano 2: Estructura principal.



Plano 3: Sistema neumático.

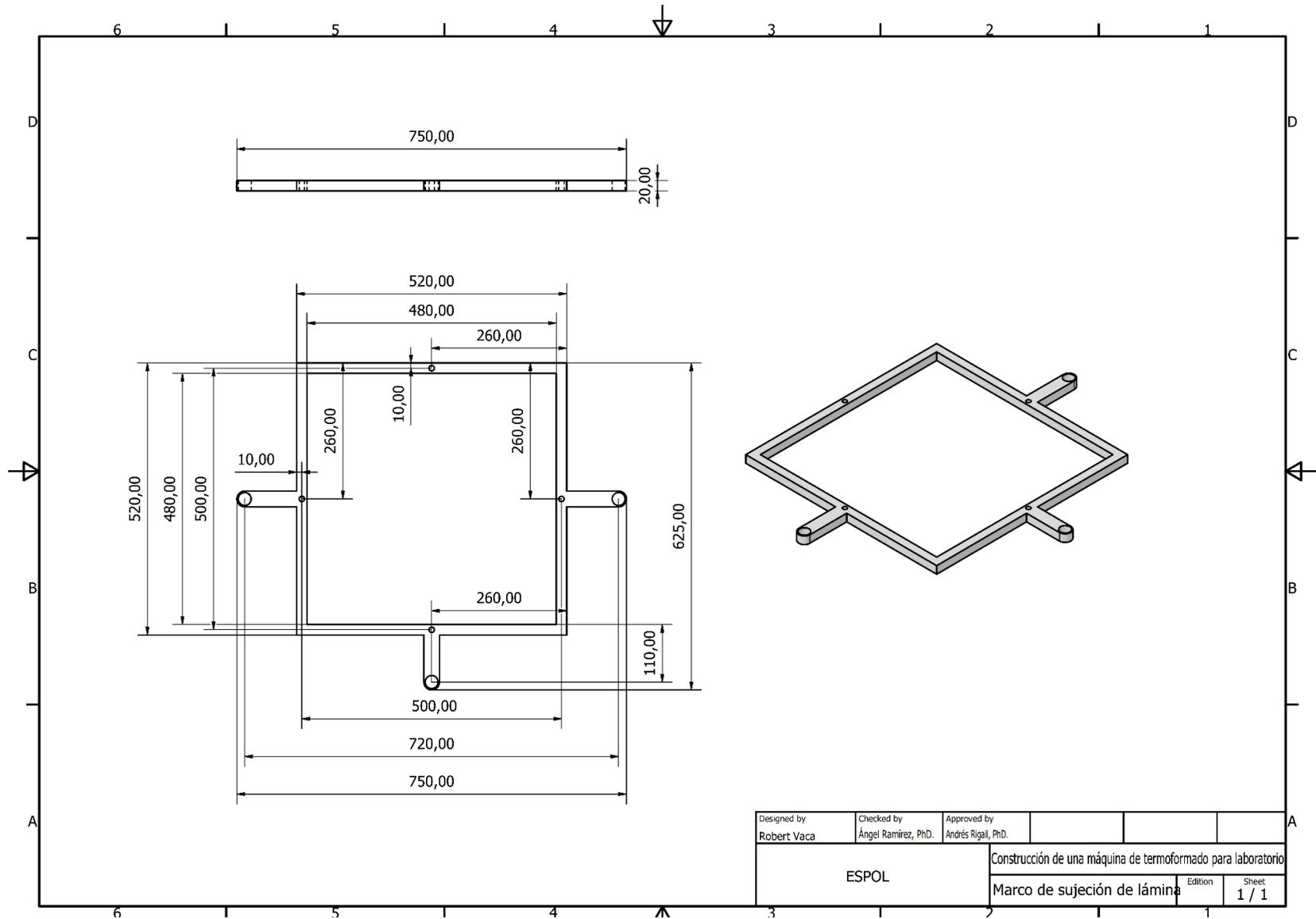


Plano 4: Soporte auxiliar del marco.

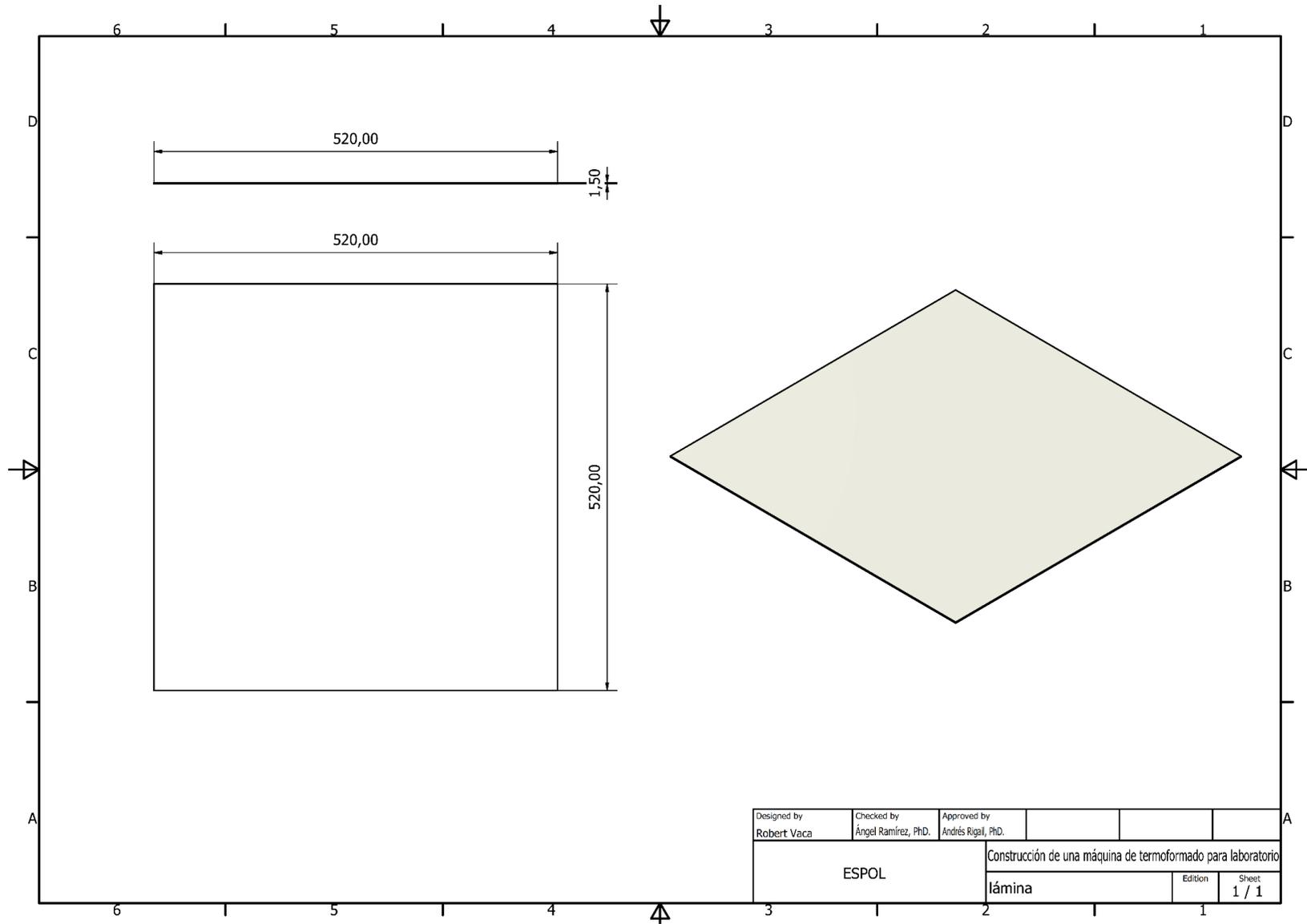


Designed by Robert Vaca	Checked by Ángel Ramírez, PhD.	Approved by Andrés Rigal, PhD.			
ESPOL		Construcción de una máquina de termoformado para laboratorio			
		Parante superior	Edition	Sheet 1 / 1	

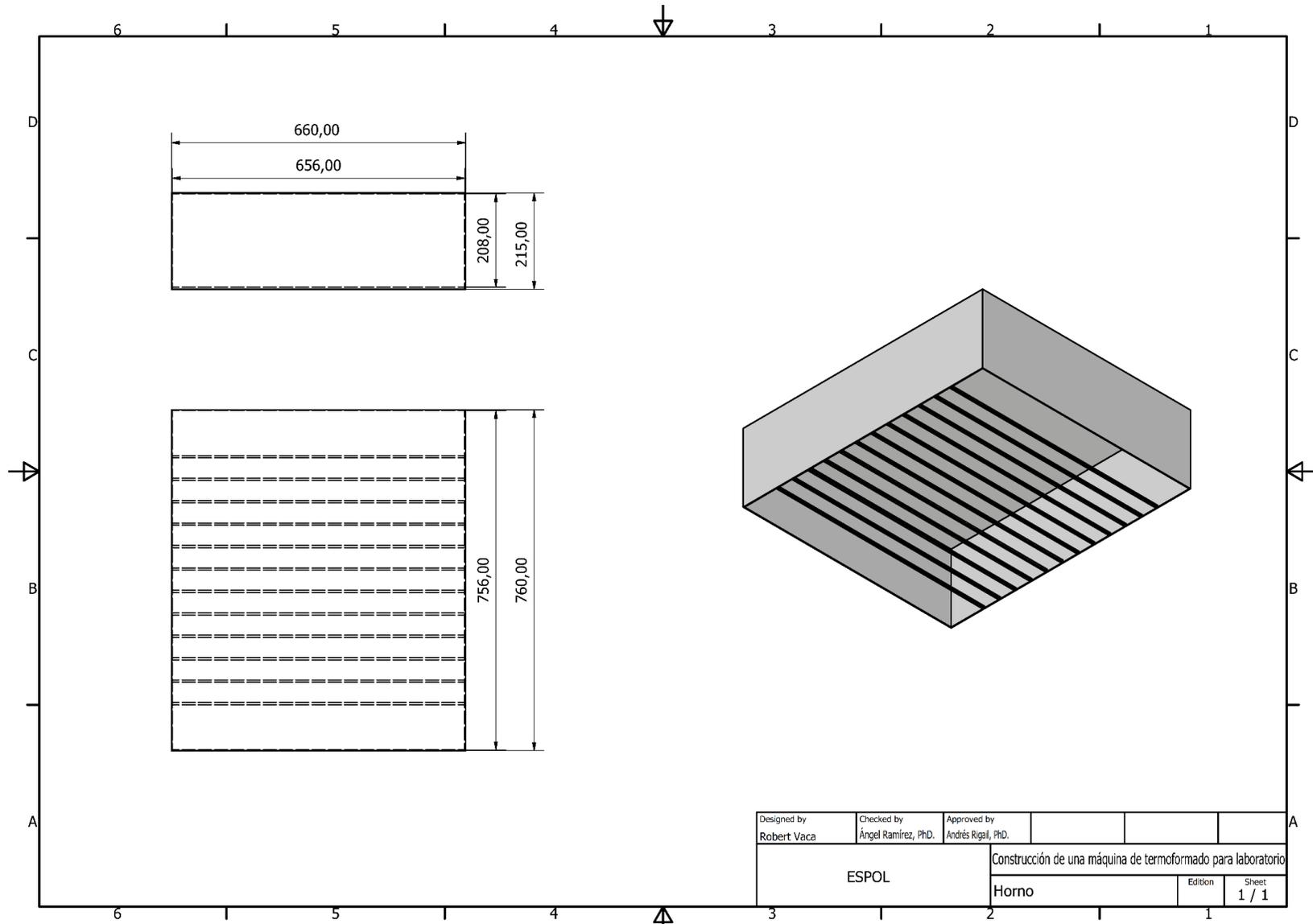
Plano 5: Parante superior.



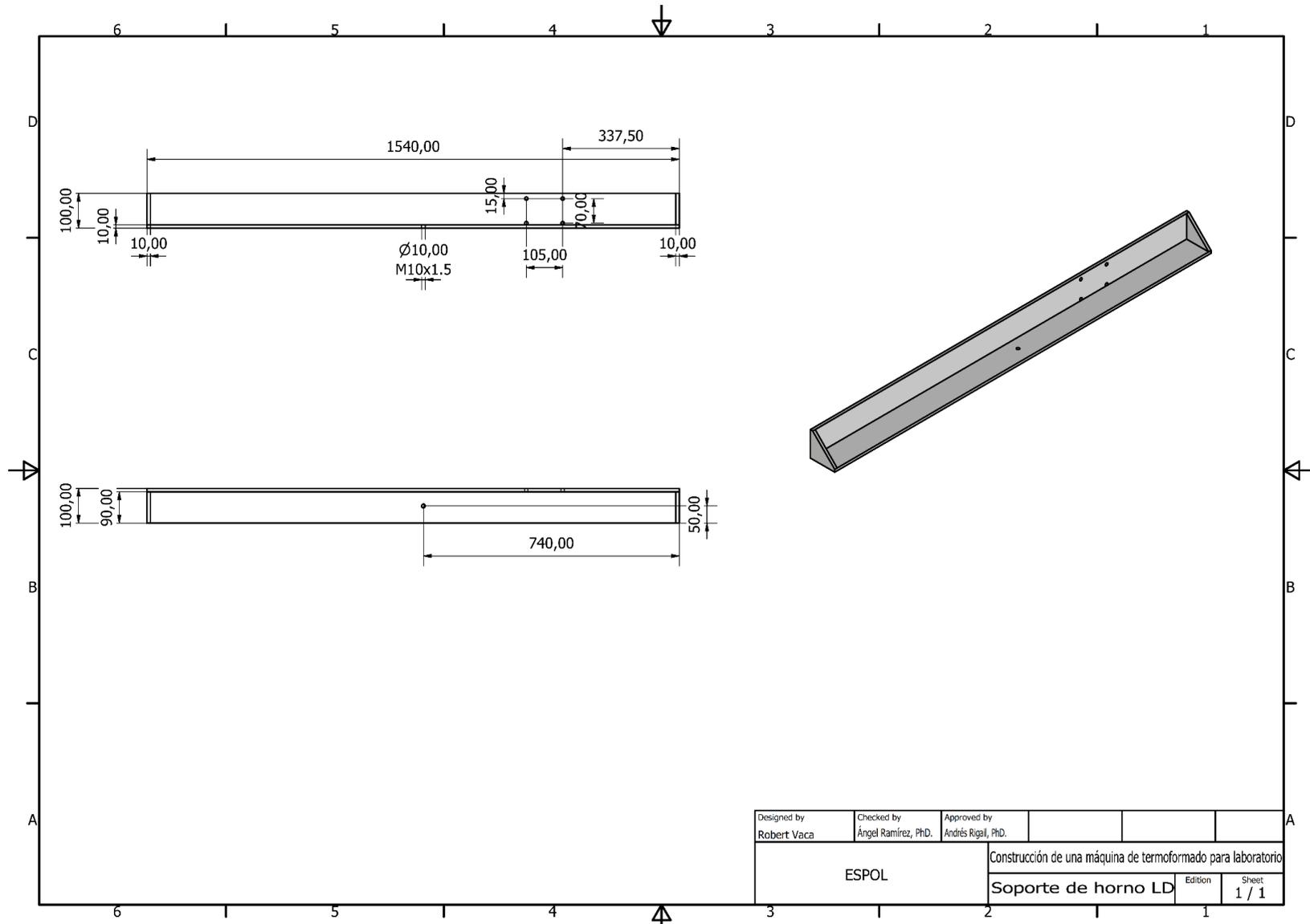
Plano 6: Marco de sujeción de lámina.



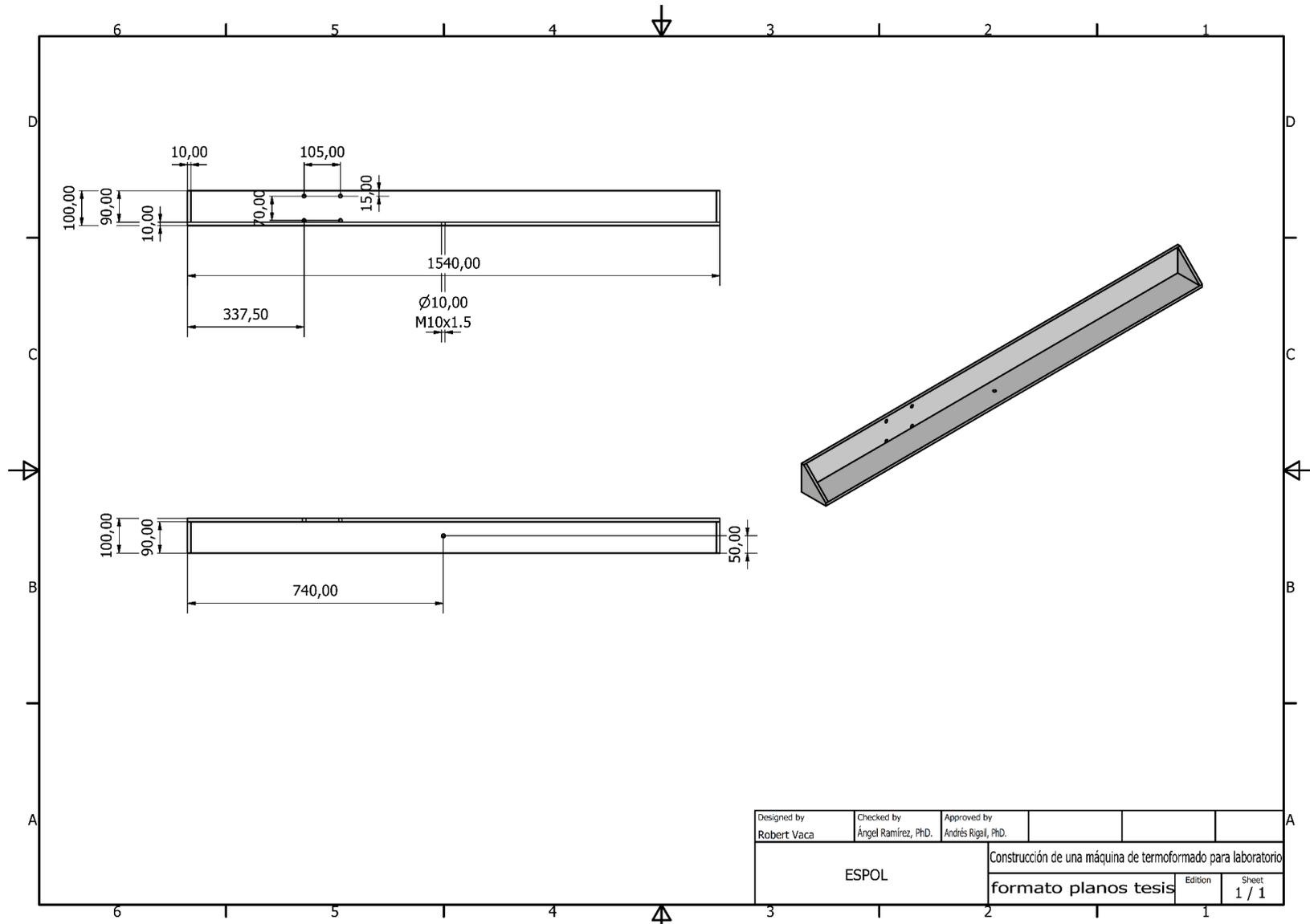
Plano 7: Lámina termoplástica.



Plano 8: Horno.



Plano 9: Soporte lateral derecho del horno.



Plano 10: Soporte lateral izquierdo del horno.

Apéndice B: Catálogos



Ceramic Infrared E-Mitters®
CRB and CRC Elements and Systems



CRB Series — Cold



CRC Series — Cold

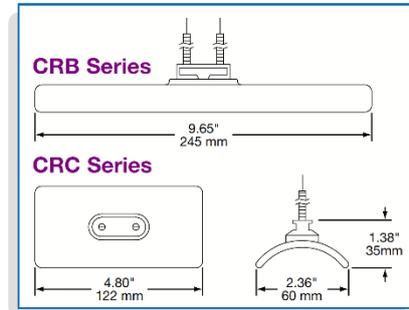
METAMORPHING Color Change™
 provides a visible indication of operation



CRB Series — Hot



CRC Series — Hot



CRB and CRC Elements are the most commonly used E-Mitter® products and are modular in construction. Therefore, they deliver an effective and simple means for designing an infrared radiant heating system for your application.

Tempco's CRB and CRC Infrared heaters are 60mm (2.36") in width and 245mm (9.65") and 122mm (4.80") in length respectively. The CRB Series is manufactured in 4 standard wattages: 250, 400, 650, & 1000. The CRC Series is manufactured in 4 standard wattages: 125, 200, 325, & 500.

Equivalent watt densities are maintained between full and half size elements (i.e., CRB 1000W-CRC 500W), allowing construction of radiant panels with uniform heat distribution patterns.

The heaters are mounted to a reflector with the built-in mounting neck, and the spring clip included with every heater. The maximum thickness of the reflector that can be used is 1.0mm (.039")

Design Features

- * Standard colors are coral, which turns to grey when energized, and traditional white.
- * Also available in optional yellow, which turns to orange when energized, or black.
- * Available with built-in standard type K thermocouple.
- * Optional Type J thermocouple is also available.
- * Long operating life—over 10,000 plus hours of continuous operation under normal conditions.
- * Performance is unaffected by vibration or adverse atmospheric conditions.
- * Large wattage range: From 125 to 1000 watts.
- * Standard stocked voltage: 220/240V.
- * 120, 208, 277, and 480 volts are available.

CRB and CRC E-MITTERS® — TECHNICAL SPECIFICATIONS

Element Type & Wattage	CRB Series (full size) CRC Series (half Size)	250W 125W	400W 200W	650W 325W	1000W 500W
Watt Density	(W/in ²)	10.3	16.6	26.8	41.3
Typical operating temperature under ideal conditions*	(°F) (°C)	752 400	932 500	1148 620	1346 730
Maximum Voltage	(VAC)	480	480	480	480
Max. Permissible Temperature*	(°F) (°C)	1022 550	1112 600	1292 700	1382 750
Infrared Radiation Wavelength	(µm)	2 to 10 for all wattages			
Heat-up constant to 63% of final temperature	(min)	4.8	3.8	3.0	2.4
Mean cool-down from the final temperature to 392°F (200°C)	(min)	7	9	11	12

*Measured by internal thermocouple



Conectores rotatorios



Resistencias eléctricas, Sensores,
Controles de temperatura



Control Colada Caliente

Ing. Robert Vaca

Universidad ESPOL

Folio cotización: 15239

Octubre 7, 2022

En atención a su solicitud de cotización, presentamos para su evaluación, nuestra oferta en precio, tipo de moneda y tiempo de entrega que a continuación se detalla:

Cotización

El 90 % de nuestros productos se fabrican sobre pedido

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio Unitario	Tiempo de Entrega
12	Piezas	RESISTENCIA INFRARROJA DE CERAMICA MODELO CRB10031, COLOR ROSA/GRIS, 1000W 220/240V	49.00 Dls.	3 Semanas.
3	Piezas	RESISTENCIA INFRARROJA DE CERAMICA MODELO CRB10033, COLOR ROSA/GRIS, CON TERMOPAR TIPO K INTEGRADO 1000W 220/240V	79.00 Dls.	1 Semanas.
12	Piezas	RESISTENCIA INFRARROJA DE CERAMICA MODELO CRB00031, COLOR BLANCO, 1000W 220/240V	49.00 Dls.	9 Semanas.
6	Piezas	RESISTENCIA INFRARROJA DE CERAMICA MODELO CRB00033, COLOR BLANCO, CON TERMOPAR TIPO K INTEGRADO 1000W 220/240V	79.00 Dls.	9 Semanas.

Compra minima 6 piezas.

Condiciones comerciales

- **Tiempo de entrega:** El que se indica
- **Precios en:** Dólares. No incluye I.V.A.
- **Condiciones de pago:** 100% ANTICIPO
- **Entrega:** ENVIO E IMPORTACION POR COBRAR
- **Vigencia de cotización:** 30 días

Asesor

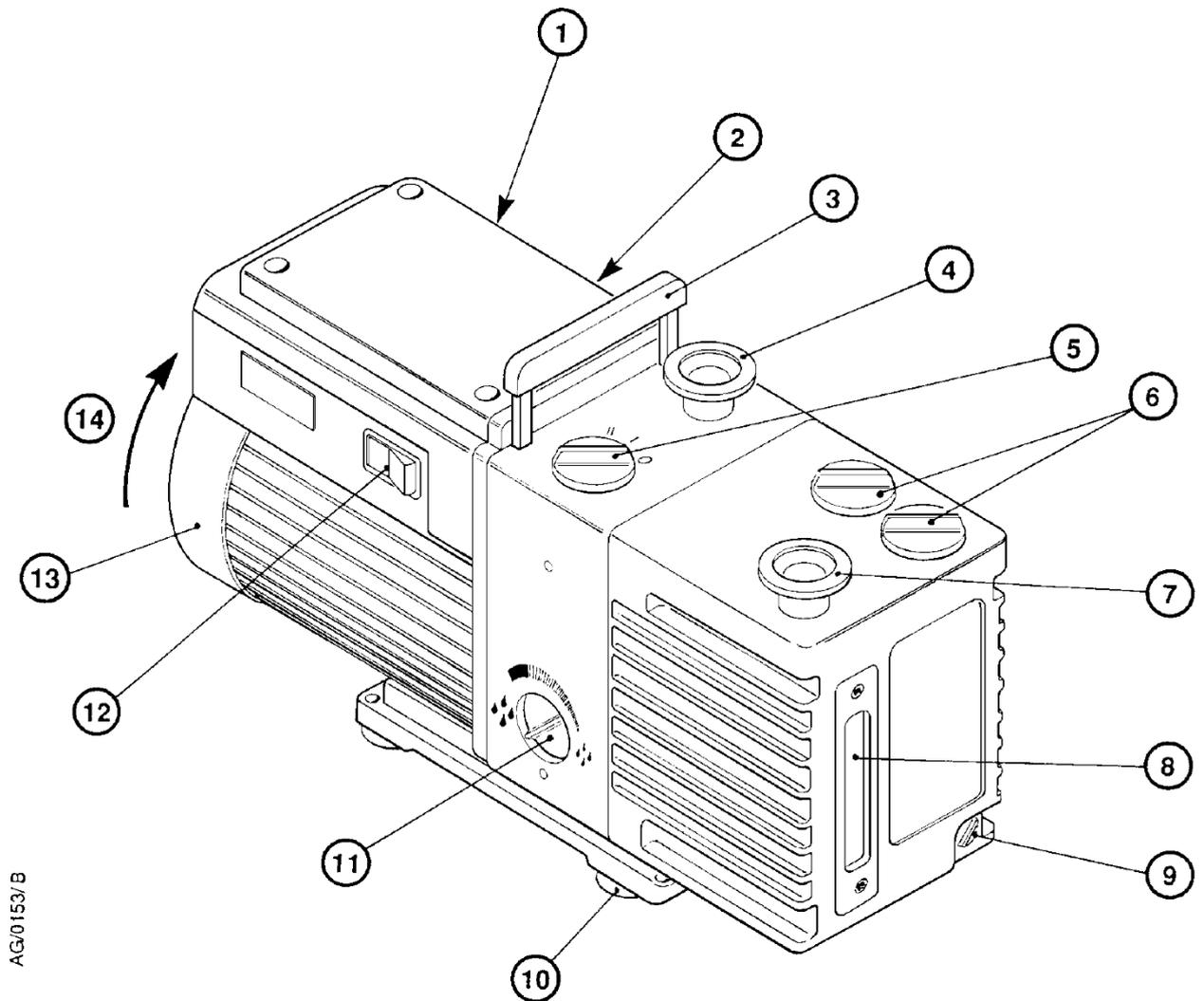
Eduardo Malfavon
eduardo.malfavon@tempcomexico.com

Amado Nervo 60-Bis.
Col. San Francisco Tetecala
Azcapotzalco, CDMX, C.P. 02730
México

TEMPCO México S.A. de C.V.
www.tempcomexico.com

Tel : (55) 2451-4070
Fax: (55) 5561-6889

Figura 1 – Bomba de paletas rotativas (RV)



AG/0153/B

- | | |
|--------------------------------|---|
| 1. Zócalo eléctrico de entrada | 8. Mirilla de control del nivel de aceite |
| 2. Indicador de tensión | 9. Tapón de vaciado de aceite |
| 3. Asa * | 10. Pies de goma (x 4) |
| 4. Porte de aspiración NW25 | 11. Selector de modalidad |
| 5. Mando de gas de lastre | 12. Interruptor de conexión † |
| 6. Tapón de llenado de aceite | 13. Cubierta del ventilador del motor |
| 7. Porte de expulsión NW25 | 14. Sentido correcto de rotación |
- * Sólo bombas RV3 y RV5; las bombas RV8 y RV12 están equipadas con un soporte de izar.
 † Sólo bombas monofásicas.

Nota: Se muestra la bomba monofásica RV3/RV5.

Figura 0.1: Bomba de paletas rotativas RV8. Partes. [Fuente: (Edwards Vacuum, 2017)]

2.2.2 Características de rendimiento

Nota: Las características de rendimiento siguientes son normales para aceite mineral.

Las posiciones del selector de modalidad y del mando de gas de lastre definen las características de rendimiento de la bomba. Dichas características se relacionan en las tablas 3 y 4.

La tabla 5 da la máxima presión de aspiración de vapor de agua y el vacío límite para cada una de las seis permutaciones de posiciones de los mandos. Las curvas 0, I y II de la figura 2 muestran la relación entre la presión de aspiración y la velocidad de bombeo para la modalidad \blacklozenge de Alto Vacío.

Figura 2 – Características de rendimiento en modalidad de Alto Vacío (velocidad de bombeo en función de la presión de aspiración)

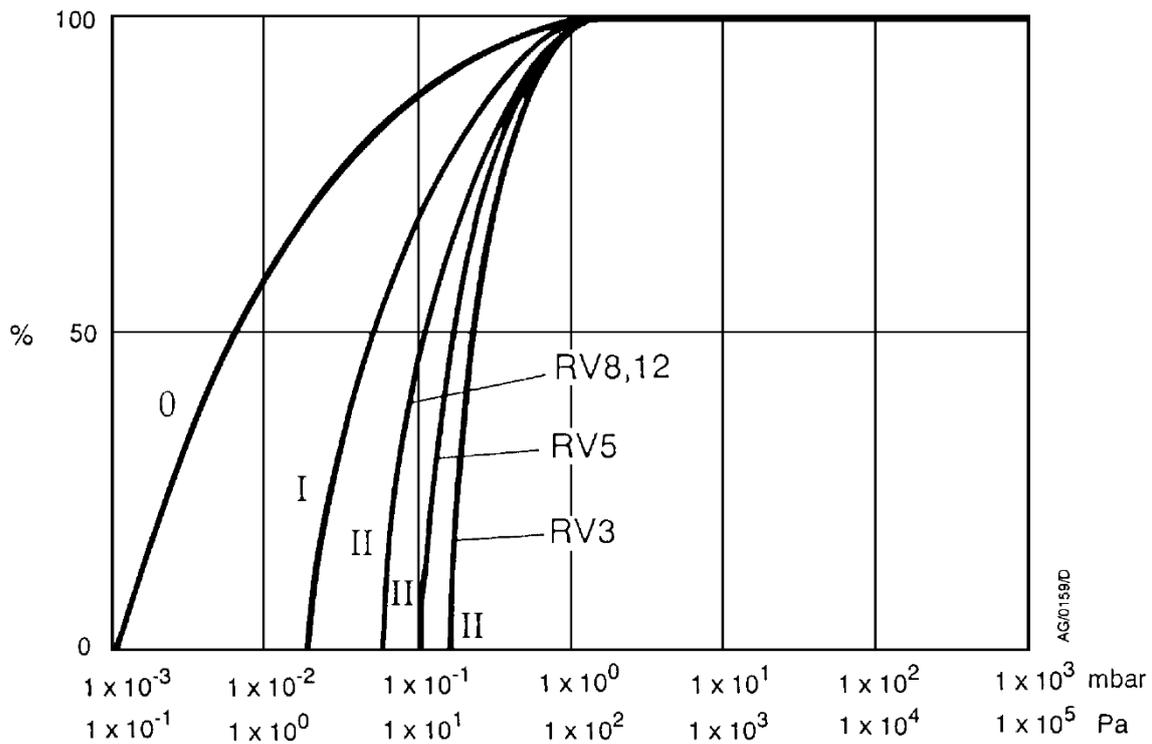


Figura 0.2: Bomba de paletas rotativas RV8. Curvas de rendimiento. [Fuente: (Edwards Vacuum, 2017)]

2.3 Datos mecánicos

Tabla 6 – Datos mecánicos

Dimensiones	Ver figura 3			
Grado de protección (IEC 34-5: 1981)				
Bombas monofásicas	IP44			
Bombas trifásicas	IP54			
Máximo ángulo de inclinación	10°			
Régimen de giro del motor				
Alimentación eléctrica 50 Hz	1470 r.min ⁻¹			
Alimentación eléctrica 60 Hz	1760 r.min ⁻¹			
Peso máximo	RV3	RV5	RV8	RV12
Bombas con motor, sin aceite	21,6 kg	21,5 kg	26,0 kg	26,3 kg
Bombas de eje desnudo	14,0 kg	14,0 kg	16,5 kg	17,5 kg

2.4 Datos de ruido y vibración

Tabla 7 – Datos de ruido y vibración

Presión acústica *				
Bombas monofásicas	48 dB (A)			
Bombas trifásicas	50 dB (A)			
Severidad de vibración †				
Bombas monofásicas	Clase 1C			
Bombas trifásicas	Clase 1C			

* Medida con vacío límite a 1 metro del extremo de la bomba según ISO 11201, modalidad de Alto vacío ♠, funcionamiento a 50 Hz.

† Medida en el puerto de aspiración según ISO 2372 (1974).

2.5 Datos de lubricación

Nota: Pueden obtenerse a petición hojas de seguridad de materiales para las bombas de aceite rotativas publicadas por Edwards.

Tabla 8 – Datos de lubricación

Aceite recomendado *				
Bombas para aceites minerales	Edwards Ultragrade 19			
Bombas para aceites PFPE	Krytox 1506 o Fomblin 06/6			
Capacidad de aceite	RV3	RV5	RV8	RV12
Máxima	0,70 litros	0,70 litros	0,75 litros	1,00 litros
Mínima	0,42 litros	0,42 litros	0,45 litros	0,65 litros

* Para accionar la bomba cuando la temperatura ambiente se encuentra fuera de los límites especificados en la sección 2.1, o para obtener el máximo rendimiento posible de la bomba al bombear vapores condensables, puede ser necesario usar otro aceite.

Figura 0.3: Bomba de paletas rotativas RV8. Curvas de rendimiento. [Fuente: (Edwards Vacuum, 2017)]

20L B

Capacity	20L
Pressure	≤1.25Mpa (12kg)

Bore Diameter	φ9
Size	280*172mm (L*w)

Sanded and Polished



Figura 0.4: Tanque de vacío. Fuente: [*Jiangsu Youcheng Zhixin Mechanical And Electrical Equipment Co., 2022*]

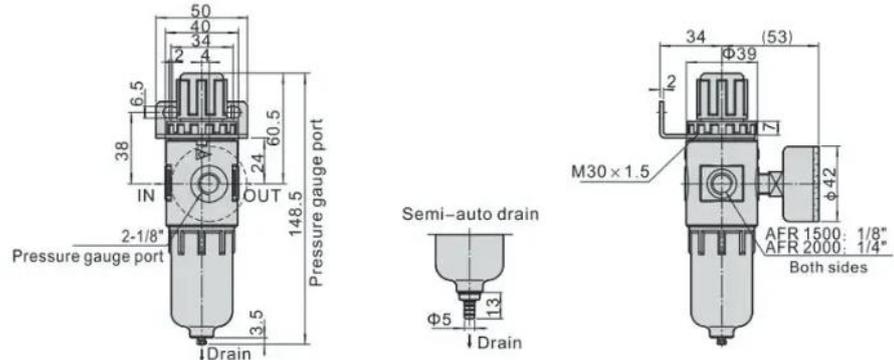
Regulador del filtro de la Unidad de Tratamiento de fuente de aire neumática Airtac tipo af1500 af2000

BFR	3000	—	
Series AFR:Small Size BFR:Middle Size	Port Size 1500:G1/8" 2000:G1/4" 3000:G3/8" 4000:G1/2"		Drain Type Blank:Manual Drain Type D:Auto Drain Type

Detalles del producto:

Filtro y regulador de la serie AFR/BFR					
Modelo	AFR1500	AFR2000	BFR2000	BFR3000	BFR4000
Medio de trabajo	Aire				
Tamaño del puerto	G1/8	G1/4	G1/4	G3/8	G1/2
Filtro de precisión	40um(5,50um es opcional)				
Ajuste de la presión de	0,05 ~ 0.85Mpa				
Max de ajuste de la presión	0.95Mpa				
Garantiza la presión	1.5Mpa				
Temperatura de trabajo	5 ~ 60 °C				
Filtro de capacidad	15(CC)		60(CC)		
Peso	0,7 kg		0,9 kg		

AFR Series



BFR Series

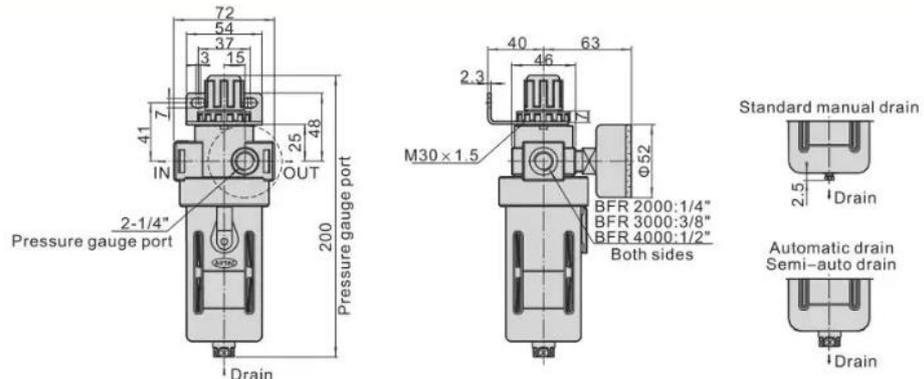


Figura 0.5: Regulador del filtro de la Unidad de Tratamiento de fuente de aire neumática.
Fuente: [(Ningbo Niubide Automation Technology Co., 2022)

ISO6431 estándar SI Series kits de sellado de cilindros neumáticos Kits de montaje piezas de reparación

Kits de montaje de alta calidad OEM fabricante ISO 15552 DNC
Kits de montaje de cilindros neumáticos serie SI estándar
ISO6431



Cylinder Kits

Model	Product	Specification	Model	Product	Specification
DNC Kits (ISO6431)		Bore size: ϕ 32,40, 50,63,80,100,125	SI Kits (ISO6431)		Bore size: ϕ 32,40,50, 63,80,100,125, 160,200
SQ Kits (ISO6431)		Bore size: ϕ 32,40, 50,63,80,100	DSN Kits (ISO6432)		Bore size: ϕ 8,10, 12,16,20,25
ADVU Kits		Bore size: ϕ 16,20, 25,32,40,50, 63,80,100	SC Kits		Bore size: ϕ 32,40,50, 63,80,100,125, 200,250,320
MA/MAL Kits		Bore size: ϕ 16,20, 25,32,40	SDA Kits		Bore size: ϕ 12,16,20, 25,32,40,50,63,80,100

Tube and piston rod for pneumatic cylinder

DNC Square Aluminum Tube		Bore size: ϕ 32,40,50, 63,80,100,125	SI/SQ Mickey Mouse Aluminum Tube		Bore size: ϕ 32,40,50, 63,80,100, 125,160,200
SC,MAL Round Aluminum Tube		Bore size: ϕ 16,20, 25,32,40,50,63, 80,100,125,160, 200,250,320	SDA Aluminum Tube		Bore size: ϕ 12,16,20,25, 32,40,50,63,80,100
DSN Stainless Steel Tube		Bore size: ϕ 8,10,12, 16,20,25,32,40	Piston rod		Bore size: ϕ 6,8,10,12, 16,20,25,32,40,45, 50,60,70,etc. Material: #45 and stainless steel

Cilindro de aire estándar de aluminio serie ISO6431 DNC

Figura 0.6: Kits de sello de cilindro neumático, conjunto de piezas de reparación, serie SI estándar ISO6431. [Fuente: (Ningbo Niubide Automation Technology Co., 2022)]

Apéndice C: Práctica de laboratorio

PRÁCTICA DE LABORATORIO

Modelado de piezas usando termoformado

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Dar forma a piezas tridimensionales utilizando la técnica de termoformado de succión por vacío, utilizando láminas termoplásticas de polietileno de alta densidad (HDPE) y poliestireno de alto impacto (HIPS).

1.2 Objetivos específicos

- Utilizar moldes macho y hembra para modelar el mismo tipo de pieza.
- Medir el grosor de pared antes y después del termoformado, y diferenciar el comportamiento del polipropileno del poliestireno. Para esto se va a utilizar láminas de 1 mm y de 4 mm.
- Medir el tiempo que le toma a las láminas termoplásticas en llegar a su estado ahulado.
- Realizar mediciones para la misma temperatura partiendo desde 300°C hasta 350°C, pero con distintos tiempos.

1.3 Introducción

El termoformado es un proceso industrial en el que la lámina (o película) termoplástica se transforma en una nueva forma usando calor y presión. Este fue uno de los primeros procesos que se utilizó en la industria del plástico comenzando con la formación de láminas de nitrato de celulosa a mediados de 1800. El crecimiento aumentó dramáticamente a medida que se desarrollaron nuevos materiales y aplicaciones. Por ejemplo, la necesidad de marquesinas de aviones en la Segunda Guerra Mundial junto con el desarrollo de metacrilato de polimetilo (acrílico) creó la oportunidad perfecta para avanzar en la tecnología del proceso de termoformado. Una tasa de crecimiento de aproximadamente del 5% al 6% se ha mantenido durante más de cuarenta y cinco años.

Hoy en día, este proceso se usa para producir muchos productos, desde pequeños paquetes de ampollas hasta exhibidores AAA, baterías de gran tamaño a grandes tragaluces y paneles interiores de aeronaves. El mercado a menudo se define por el final uso de los productos que se fabrican. Los "productos industriales" incluyen artículos con una vida útil esperada como los utilizados en las industrias del transporte y la construcción. Los "productos desechables" (sin empaque) incluyen artículos que tienen una vida útil corta pero que no se encuentran en el lado del empaque del negocio. Este mercado incluye platos de plástico desechables y vasos para beber. Los "Productos de embalaje" son una enorme industria de gran volumen dedicada a proporcionar a los fabricantes envases de bajo costo para exhibir, proteger y/o extender la vida de sus productos.

Ventajas de usar termoformado

- Bajos costos de fabricación de piezas ya sea en pequeños o grandes volúmenes.
- Corto tiempo de diseño de moldes, los cuales pueden incluso ser realizados mediante impresión 3D.

2 Procedimiento

La tabla 1 muestra el procedimiento que debe seguirse para la presente práctica.

El procedimiento radica básicamente en realizar al menos 7 pruebas para cada temperatura, pero variando su tiempo, por ejemplo; para $T = 300^{\circ}\text{C}$, realizar el mismo ensayo a 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 segundos, luego; realizar lo mismo para las siguientes temperaturas, y verificar cual es el comportamiento de la termoforma final. Para ello, tomar en cuenta que todas las láminas a ensayarse deben de estar correctamente con su rayado en formas de cuadrícula, tal como se muestra en el ejemplo de esta práctica.

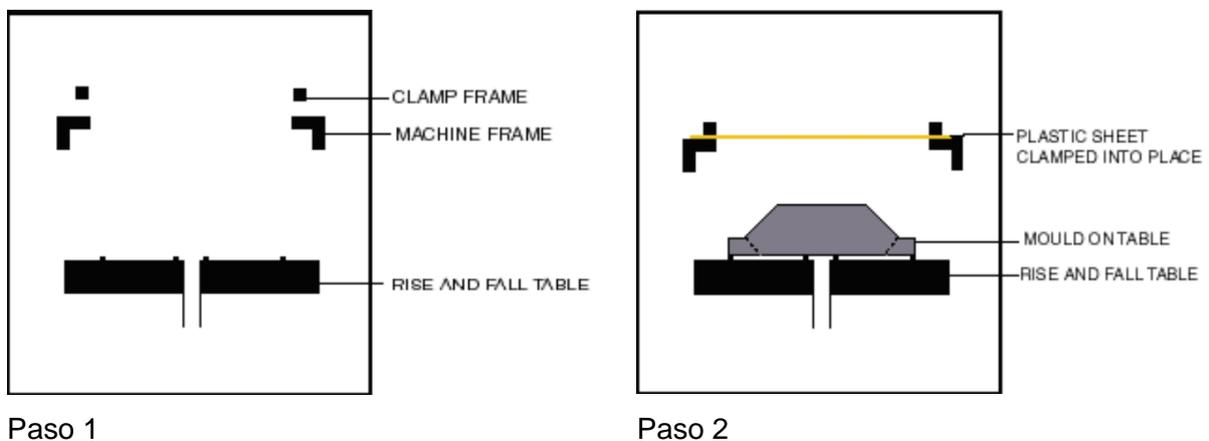
Siga los siguientes pasos para realizar un buen ensayo:

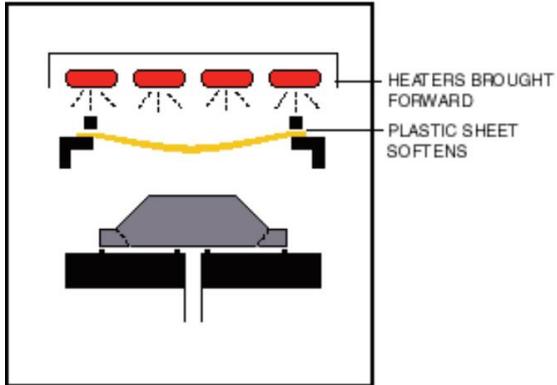
Paso 1: Verificar que todos los implementos de la máquina estén correctamente ubicados. En especial el marco, y la masa de vacío.

Paso 2: Ubicar la lámina termoplástica en su correspondiente marco y de igual manera el molde macho o hembra.

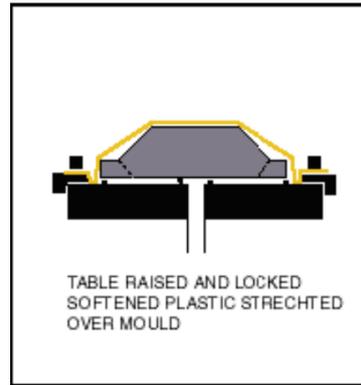
- Paso 3: Cuando el horno ha alcanzado la temperatura deseada, activar el sistema neumático para subir el marco que contienen la lámina termoplástica hasta acercarlo al horno, hasta que se alcance su temperatura de revenido (estado ahulado). En este paso debe trabajar muy cuidadosamente de manera que evite riesgo por quemaduras o golpes. Tómese el tiempo mediante cronómetro.
- Paso 4: Una vez que la lámina ha alcanzado su temperatura de revenido, descender el marco que contiene la lámina hasta ponerla en contacto con el molde, de manera que el marco que contiene la lámina toque la mesa de vacío.
- Paso 5: Una vez que el marco se ha puesto en contacto con la mesa de vacío, teniendo en el medio al molde; efectuar la succión del aire presente entre la lámina termoplástica y el molde. Esto se hace al abrir la válvula que permite al tanque acumulador liberar su presión interna debido al vacío creado. Para este ensayo se libera el 100% de la presión de vacío, es decir; 30 inHg o -100kPa.
- Paso 6: Luego de haber realizado el moldeo por succión de aire y enfriado la lámina retirar los seguros del marco de la lámina, retirar el molde junto con la lámina y en lugar apartado de la máquina de termoformado, proceder a separar cuidadosamente el molde de la termoforma.
- Paso 7: Cortar a pieza como como el profesor le recomiende (puede hacerlo también siguiendo el contenido de esta guía) para realizar las mediciones con regla, calibrador vernier y micrómetro.

Table 1: Proceso para realizar el termoformado en el laboratorio. Fuente: (Multifab Manufacturing, 2018)

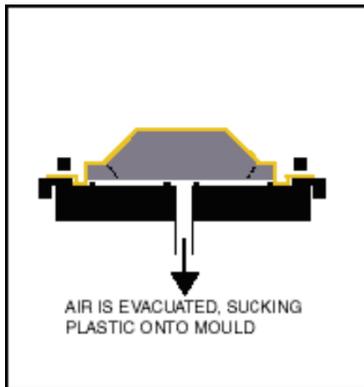




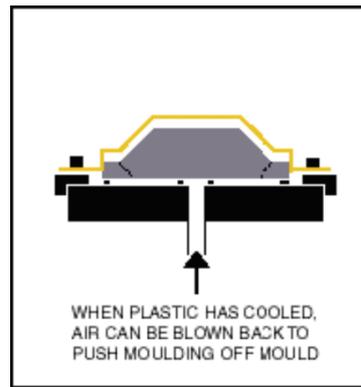
Paso 3



Paso 4



Paso 5



Paso 6



Paso 7

A continuación, en la figura 1, se presentan los modelos básicos con los que se va a trabajar, los cuales pueden variar dependiendo del tipo de molde que se tenga disponible.

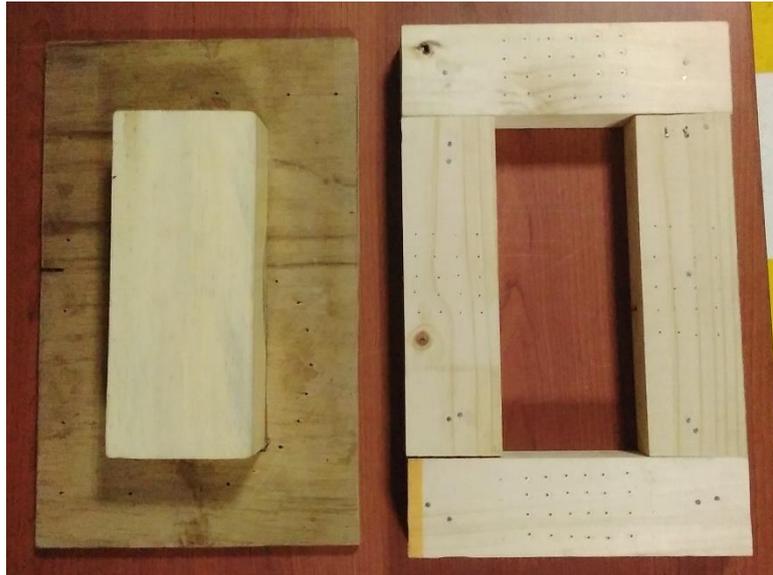
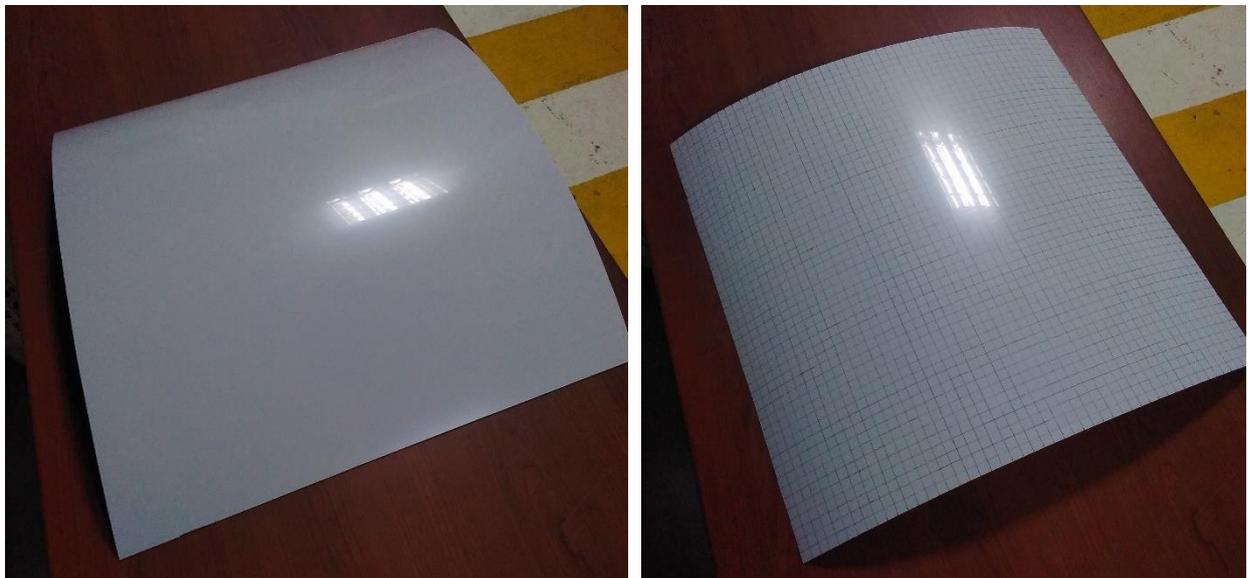


Figure 1: Molde macho a la izquierda y hembra a la derecha. Fuente: Elaboración propia.



a)

b)

Figure 2: Lámina de HDPE sin las cuadrículas. b) Lámina de termoplástico con el rayado recomendable, previo al termoformado. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias interplanares para esta práctica hacen referencia a las líneas dibujadas en forma de cuadrícula sobre la lámina termoplástica antes de que sea calentada. Para esto, se debe tomar en cuenta que se necesitará regla y lápiz (o equivalente). Se recomienda líneas paralelas distanciadas como máximo $\frac{1}{2}$ in., en esta práctica se trabajará con cuadrados de lado 10 mm, tal como se aprecia en la figura 3.

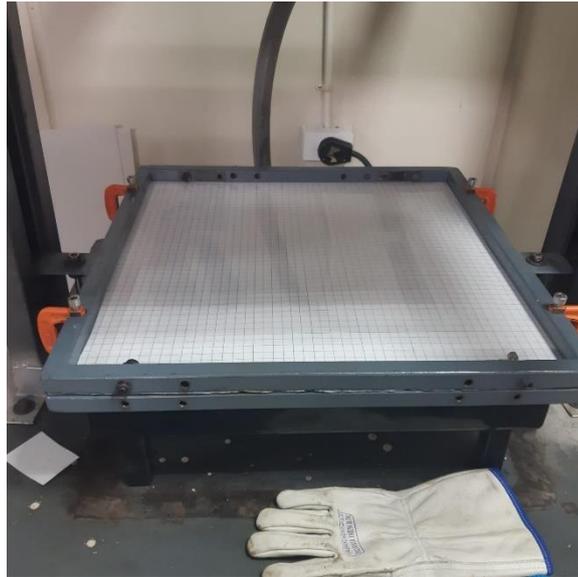


Figure 3: Lámina termoplástica con su respectiva cuadrícula ubicada en el marco porta láminas. Fuente: elaboración propia.

3 Resultados esperados

Una vez realizada una pieza mediante el termoformado, tanto macho como hembra, cortar la pieza en secciones que le permita verificar la variación de grosor de pared, y de esta manera completar la tabla 3 y la tabla 4. La tabla 1, también debe ser llenada, pero esta a medida que se realiza la termoforma, no olvidar ir tomando apuntes.

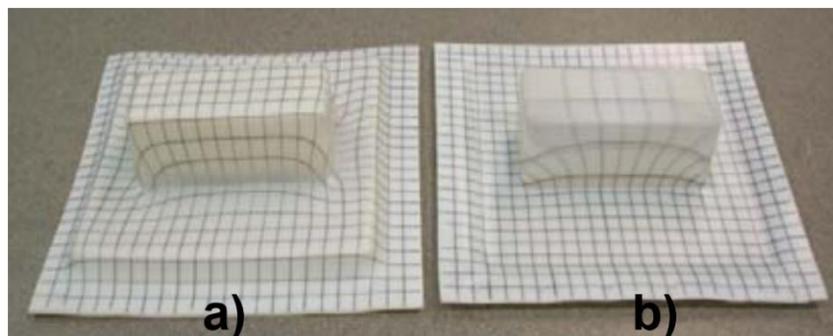


Figure 4: Vistas laterales. a) Termoforma hecha con molde macho y b) Termoforma hecha con el molde hembra. Fuente: (Klein, 2009)

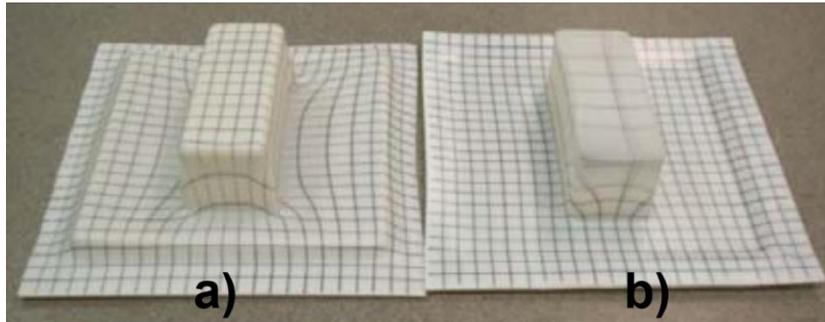


Figure 5: Vistas frontales. a) Termoforma hecha con molde macho y b) Termoforma hecha con el molde hembra. Fuente: (Klein, 2009)

- Verificar qué sección de las líneas fue la que tuvo mayor deformación; la de molde macho o la de molde hembra.
- Donde se adelgazó más la pared; las áreas del termoplástico que realizan contacto con el molde antes de la succión de vacío o después.
- Gráfico de espesor de pared desde el centro del molde hasta el borde vs distancia. Realizar como mínimo diez divisiones.

Table 2: Tabla para reunir datos del ensayo a la misma temperatura y diferentes tiempos de exposición. Fuente: elaboración propia.

HDPE @1mm espesor de lámina molde macho					
Número de ensayo	Temperatura del horno justo antes de subir el marco con la lámina [°C]	Temperatura del horno justo antes de bajar el marco con la lámina [°C]	Tiempo que el marco estuvo arriba (o en contacto con el horno) [s]	Molde tipo macho	Molde tipo hembra
			30		
			40		
			50		
			60		
			70		
			80		
			90		
			100		
			110		
			120		

Table 3: Datos experimentales para el termoformado utilizando láminas de polietileno de alta densidad. Molde macho. Fuente: elaboración propia.

HDPE @1mm espesor de lámina molde macho			
Distancia medida desde el borde de la pieza cortada [mm]	Espesor de pared	Distancia interplanar horizontal	Distancia interplanar vertical
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			
110			
120			

Table 4: Datos experimentales para el termoformado utilizando láminas de poliestireno de alto impacto. Molde Macho.

HIPS @1mm espesor de lámina molde macho			
Distancia medida desde el borde de la pieza cortada [mm]	Espesor de pared	Distancia interplanar horizontal	Distancia interplanar vertical
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			
110			
120			

Table 5: Datos experimentales para el termoformado utilizando láminas de polietileno de alta densidad. Molde hembra.

HDPE @1mm espesor de lámina molde hembra			
Distancia medida desde el borde de la pieza cortada [mm]	Espesor de pared	Distancia interplanar horizontal	Distancia interplanar vertical
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			
110			
120			

Table 6: Datos experimentales para el termoformado utilizando láminas de poliestireno de alto impacto. Molde hembra.

HIPS @1mm espesor de lámina molde hembra			
Distancia medida desde el borde de la pieza cortada [mm]	Espesor de pared [mm]	Distancia interplanar horizontal [mm]	Distancia interplanar vertical [mm]
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			
110			
120			

4 Preguntas de la práctica

- I. ¿Qué material se debe utilizar para realizar piezas termoformadas?
- II. Con respecto a la pregunta 1, indique si dichos materiales existen en el mercado local e indique sus precios.
- III. Indique la geometría que debe tener la lámina termoplástica y porqué.
- IV. Indique la geometría máxima que debe tener el molde y porqué.
- V. ¿De qué manera se pueden relacionar las áreas a ser termoformadas, entre el molde y la lámina termoplástica?
- VI. ¿Cómo afectan los ángulos o puntas del molde a la pieza termoformada?
- VII. ¿De qué manera se realizan las termoformas de manera que no se presenten arrugas?
- VIII. Indique el tiempo máximo en el cual la lámina no se va a estirar más. Este dato puede ser obtenido de la tabla 2, aunque podría variar dependiendo del espesor de la lámina y su tipo de material. Para el actual ensayo, los datos dados de 30 s a 120 s son suficiente.
- IX. De qué manera afecta al producto final de termoformado el tener o no agujeros de máximo 1mm en la pieza molde.

5 Referencias

- Klein, P. W. (2009). Fundamentals of Plastic Thermoforming. Ohio: Morgan & Claypool Publishers.
- Krix, H. (23 de Mayo de 2012). Protoform Vacuum Forming Machine. Obtenido de Volpin Props: <https://www.volpinprops.com/protoform-vacuum-forming-machine/>
- Multifab Manufacturing. (2018). Thermoforming Design Guidelines. Spokane, Washington, 99216: Multifab Corporation.