

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Alexis Jamil Calle Cabrera

Marcos Andrés Sánchez Marcillo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su eterna compañía e infinito amor. A mi madre, por ser motor de mi vida y ejemplo de sacrificio y amor por sus hijos. A mi padre, por enseñarme a ver la vida con alegría. A Dome, por su apoyo incondicional. A mi familia en general, por siempre mantenerse unidos. A mis amigos y a todos los que me acompañaron en el camino para alcanzar esta meta.

Alexis Jamil Calle Cabrera

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a la Virgen María que me han acompañado durante toda mi vida. A mis padres, que con su ejemplo y apoyo me enseñaron a nunca rendirme. A mis hermanas que con su compañía me hicieron más fuerte durante este trayecto. Y a todos los que hicieron que este trabajo de alguna u otra manera sea posible.

Marcos Andrés Sánchez Marcillo

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Alexis Jamil Calle Cabrera

Marcos Andrés Sánchez Marcillo

PhD. Andrés Francisco Rigail Cedeño

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

Alexis Calle Cabrera

Marcos Sánchez Marcillo

PhD. Andrés Rigail

DIRECTOR

RESUMEN

La alta versatilidad del plástico ha desarrollado la industria de la manufactura a pasos agigantados; tanto la ciencia de materiales y las técnicas de procesamiento de polímeros crecen a la par, presentando nuevos desafíos para las próximas generaciones de profesionales.

Ante la ausencia de prácticas de laboratorio que recreen la técnica de Termoformado en el laboratorio de procesamiento de polímeros en ESPOL, se presenta el diseño de una máquina de Termoformado con el objetivo de ofrecer una herramienta de laboratorio que permita al estudiante entender los conceptos explicados en clase.

El proceso de Termoformado se basa en láminas termoplásticas que se calientan para adoptar la forma de moldes mediante la aplicación de fuerzas externas. Las mejores alternativas de diseño fueron seleccionadas mediante una matriz de decisión, donde:

El calentamiento se realiza mediante un horno de resistencia eléctricas formadas de tubo de Incoloy, alambre de resistencia Kanthal 80/20, material níquel-cromo que entrega 2200 W de potencia. El moldeo es producto de la fuerza de succión entregada por un sistema de vacío, que está conformado por una Bomba de vacío de una etapa con capacidad de bombeo de 1.5 CFM y un tanque acumulador de vacío de 20 litros. Un termopar tipo K envía señales a una tarjeta Arduino, que mediante una interfaz gráfica del programa Matlab brinda información relevante del proceso.

El costo final del presente proyecto es de \$ 1878.22, tomando en cuenta costos directos e indirectos del proceso de construcción.

Palabras clave: laboratorio, proceso, termoplástico, sistema de calentamiento, sistema de vacío, sistema de control.

ABSTRACT

The high versatility of plastic has developed the manufacturing industry at an accelerated pace; Both materials science and polymer processing techniques grow at the same time, presenting new challenges for future generations of professionals.

In the absence of laboratory practices that recreate the thermoforming technique in the polymer processing laboratory of ESPOL, the design of a thermoforming machine is presented with the objective of offering a laboratory tool that allows the student to understand the concepts explained in class.

The thermoforming process is based on thermoplastic sheets that are heated to take the form of molds by the application of external forces. The best design alternatives were selected using a decision matrix, where:

The heating is carried out by means of an electric resistance furnace formed by Incoloy tube, resistance wire Kanthal 80/20, nickel-chromium material that delivers 2200 W of power. The molding is product of the suction force delivered by a vacuum system It consists of a single stage vacuum pump with a pump capacity of 1.5 CFM and a vacuum accumulator tank of 20 liters. A K-type thermocouple sends signals to an Arduino board, which through a Matlab program graphical interface provides relevant process information.

The final cost of this project is \$ 1878.22, taking the direct and indirect costs of the construction process.

Keywords: laboratory, process, thermoplastic, heating system, vacuum system, control system.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE PLANOS	XIV
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3 MARCO TEÓRICO.....	4
1.3.1 <i>Polímeros</i>	4
1.3.2 <i>Efecto de la temperatura en los termoplásticos</i>	5
1.3.3 <i>Termoformado</i>	6
1.3.3.1 <i>Termoformado al vacío</i>	7
1.3.3.2 <i>Termoformado a presión</i>	8
1.3.3.3 <i>Termoformado mecánico</i>	8
1.3.4 <i>Técnica de termoformado</i>	9
1.3.4.1 <i>Fijación de la lámina</i>	9
1.3.4.2 <i>Calentamiento de la lámina</i>	9
1.3.4.3 <i>Formado de la lámina</i>	10
1.3.5 <i>Temperaturas importantes en el proceso de Termoformado</i>	10
1.3.6 <i>Parámetros a evaluar en piezas producto del Termoformado</i>	11

CAPÍTULO 2	13
2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO	13
2.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	13
2.2 CRITERIOS DE DISEÑO	14
2.3 PONDERACIÓN DE CRITERIOS	14
2.4 ALTERNATIVAS PROPUESTAS.....	16
2.5 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	17
2.5.1 <i>Sistema de formado</i>	18
2.5.2 <i>Sistema de calentamiento</i>	19
2.5.3 <i>Sensor de temperatura</i>	20
2.5.4 <i>Sistema de adquisición de datos</i>	21
2.6 CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS.....	22
2.7 ESQUEMA DE METODOLOGÍA DE DISEÑO	23
2.8 DISEÑO CONCEPTUAL	24
2.9 DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO	24
2.9.1 <i>Análisis de transferencia de calor entre el calentador y la lámina</i> ..	26
2.9.2 <i>Tiempo de exposición de las láminas al calentamiento</i>	28
2.9.3 <i>Temperaturas en las paredes del horno</i>	29
2.9.4 <i>Espesor del aislante</i>	31
2.9.5 <i>Calor necesario para calentar la lámina</i>	32
2.9.6 <i>Pérdidas de calor</i>	32
2.9.6.1 <i>Pérdidas por conducción</i>	32
2.9.6.2 <i>Pérdidas por convección</i>	33
2.9.6.3 <i>Pérdidas por radiación</i>	35
2.9.7 <i>Potencia del horno</i>	35
2.10 DISEÑO DEL SISTEMA DE VACÍO	35
2.10.1 <i>Selección de Bomba de Vacío</i>	36
2.10.2 <i>Selección de Tanque acumulador de vacío</i>	37
2.11 MECANISMO DE MOVIMIENTO DE LA LÁMINA.....	38
2.11.1 <i>Marco de sujeción</i>	38
2.11.2 <i>Mecanismo de movimiento</i>	39
2.11.3 <i>Longitud de la palanca</i>	41
2.12 ESTRUCTURA DE LA MÁQUINA.	42

2.13 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	45
CAPÍTULO 3.....	48
3. RESULTADOS	48
3.1 RESULTADO DE SISTEMA DE CALENTAMIENTO	48
3.1.1 <i>Tiempo de calentamiento de las láminas</i>	48
3.1.2 <i>Temperatura en las paredes del horno.....</i>	49
3.1.3 <i>Espesor del aislante</i>	50
3.1.4 <i>Energía requerida para calentar la lámina.....</i>	50
3.1.5 <i>Pérdidas de calor.....</i>	51
3.1.6 <i>Potencia del horno calculada</i>	52
3.2 RESULTADOS DEL SISTEMA DE VACÍO	53
3.2.1 <i>Selección de bomba de Vacío.....</i>	53
3.2.2 <i>Selección de Tanque acumulador de vacío.....</i>	54
3.2.3 <i>Descripción del Sistema de Vacío.....</i>	55
3.3 RESULTADOS DEL MECANISMO DE MOVIMIENTO DEL MARCO DE LA LÁMINA.....	57
3.3.1 <i>Resultados marco de sujeción.</i>	57
3.3.2 <i>Resultados de mecanismo de movimiento.</i>	57
3.3.3 <i>Resultados de longitud de palanca.....</i>	59
3.4 VALIDACIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	60
3.5 ADQUISICIÓN DE DATOS	63
3.6 ANÁLISIS DE COSTOS	67
3.6.1 <i>Costos Directos</i>	67
3.6.2 <i>Costos Indirectos.....</i>	70
3.6.3 <i>Costo Total del Proyecto.</i>	70
CAPÍTULO 4.....	71
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	71
4.1 CONCLUSIONES	72
4.2 RECOMENDACIONES.....	73
BIBLIOGRAFÍA	75
APÉNDICES	76

ABREVIATURAS

AC	Alternating Current (Corriente alterna)
CFM	Cubic feet per minute (Pie cúbico por minuto)
DC	Direct Current (Corriente continua)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
HDPE	High Density Polyethylene (Polietileno de alta densidad)
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
IVA	Impuesto al Valor Agregado
PLC	Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable)
PS	Poliestireno
PSI	Pounds per Square Inch (Libras por Pulgada Cuadrada)
DAQ	Data Acquisition (Adquisición de datos)
ASTM	American Society for Testing and Materials
NC	Normalmente cerrada

SIMBOLOGÍA

C_p	Calor específico
m_L	Masa de la lámina
$Q_{1 \rightarrow 2}$	Calor radiante emitido por el calentador hacia la lámina
Q_c	Energía necesaria para calentar la lámina
T_a	Temperatura inicial de la lámina
T_b	Temperatura de formado de la lámina
$\frac{W}{m^2K}$	Watts sobre metros cuadrados Kelvin
$\frac{W}{mK}$	Watts sobre metros Kelvin
$\frac{kg}{m^3}$	Kilogramos sobre metros cúbicos
m^2	Metros cuadrados
Δt	Incremento de tiempo
$^{\circ}C$	Grados Celsius
s	Segundos
V	Voltios
σ	Constante de Stefan Boltzman
K	Grados Kelvin
W	Watts
cm	Centímetros
kg	Kilogramos
mm	Milímetros
mm^3	Milímetros cúbicos
ft^3	Pies cúbicos
lt	Litros
L	Longitud
D	Diámetro
<i>Amp</i>	Amperio
<i>e</i>	Espesor
<i>cm</i>	Centímetro
<i>A</i>	Dimensión perfiles estructurales
<i>B</i>	Dimensión perfiles estructurales
<i>N</i>	Newton

$A_1 F_{12}$	Conductancia entre las superficies del calentador y la lámina
T	Temperatura del calentador
$T_{\text{prom-lamina}}$	Temperatura promedio de la lámina
ε_1	Emisividad del calentador
ε_2	Emisividad de la lámina
F_{1-2}	Factor de visión entre el calentador y la lámina
A	Área del calentador
T_{i+1}	Temperatura después del incremento de tiempo
T_i	Temperatura al instante inicial
T_4	Temperatura de la superficie exterior del horno
T_3	Temperatura de la superficie exterior del aislante
T_2	Temperatura de la superficie interior del aislante
T_1	Temperatura de la superficie interior del horno
T_{amb}	Temperatura ambiente
q	Flujo de calor a través de las paredes del horno
h_c	Coefficiente de convección
A_{wall}	Área de la pared del horno
e_3	Espesor de la pared exterior del horno
e_2	Espesor del aislante
e_1	Espesor de la pared interior del horno
k_{steel}	Conductividad térmica del acero
k_{isolated}	Conductividad térmica del aislante
T_{media1}	Temperatura promedio de la pared interior del horno
T_{media2}	Temperatura promedio del aislante
T_{media3}	Temperatura promedio de la pared exterior del horno
ΔT_{w1}	Diferencia de temperatura entre la pared interior del horno y el aire exterior
ΔT_{w2}	Diferencia de temperatura entre el aislante y el ambiente
ΔT_{w3}	Diferencia de temperatura entre la pared exterior del horno y el aire exterior
m_{w1}	Masa de la pared interior del horno
m_{w2}	Masa del aislante
m_{w3}	Masa de la pared exterior del horno

k_{air}	Conductividad del aire
L	Longitud característica
Gr	Número de Grashof
Pr	Número de Prandtl
T_{film}	Temperatura de película
ρ_{air}	Densidad del aire
ν	Viscosidad cinemática
g	Gravedad
$Q_{\text{conv-lat}}$	Calor perdido por convección en las paredes laterales
$Q_{\text{conv-top}}$	Calor perdido por convección en la parte superior del horno
Q_{rad}	Calor perdido por radiación
Q_p	Perdida de calor total
Q_{furnace}	Potencia del horno
η	Factor de seguridad estático
S_y	Esfuerzo de fluencia
σ_{max}	Esfuerzo máximo
σ_{max}	Esfuerzo máximo
L	Largo de la base del objeto deformado
W	Ancho de la base del objeto deformado
H	Altura del objeto deformado
AR	Relación de áreas
V_{objeto}	Volumen del objeto deformado
L_{mesa}	Largo de mesa de vacío
W_{mesa}	Ancho de mesa de vacío
H_{mesa}	Altura de mesa de vacío
V_{mesa}	Volumen de mesa de vacío
d	Diámetro de manguera neumática
l	Longitud de manguera neumática
V_{manguera}	Volumen de manguera neumática
V_{total}	Volumen total del sistema
S_p	Capacidad de bombeo del generador de vacío
t	Tiempo de aplicación de vacío

P_1	Presión atmosférica
P_2	Presión de Termoformado
V_{tanque}	Volumen del tanque acumulador de vacío
Y_p	Distancia que baja el marco de sujeción
X_c	Longitud de la corredera
ΔY	Deformación máxima debido al peso del marco
W_m	Peso del marco
K_r	Constante del resorte
F_b	Fuerza del brazo humano
L_b	Longitud de la palanca
F_r	Fuerza del resorte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cadena molecular de Polietileno de alto modulo.	4
Figura 2. Estructura molecular del polímero en relación a su temperatura	6
Figura 3. Termoformado al vacío	7
Figura 4. Termoformado a presión	8
Figura 5. Termoformado mecánico	8
Figura 6. Distribución de espesores en pieza final.	11
Figura 7. Acabado superficial de un sistema de vacío (izq.) y un sistema de presión (der.)	12
Figura 8. Esquema de metodología de diseño	23
Figura 9. Esquema de diseño conceptual	24
Figura 10. Esquema del sistema de calentamiento	25
Figura 11. Circuito análogo para un recinto de dos superficies grises conectados por una superficie re-radiante	27
Figura 12. Factor de forma para superficies rectangulares opuestas.....	28
Figura 13. Esquema de las paredes del horno y sus temperaturas	29
Figura 14. Dimensiones de la mesa de vacío.....	36
Figura 15. Esquema de la geometría marco – mesa de vacío	38
Figura 16. Secuencia del movimiento del mecanismo de movimiento	39
Figura 17. Geometría de la corredera del mecanismo	40
Figura 18. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo de movimiento	41
Figura 19. Estructura de la maquina	43
Figura 20. Dimensiones de perfil angular y cuadrado	43
Figura 21. Modelo matemático de la estructura	44
Figura 22. Esquema del sistema de adquisición de datos	46
Figura 23. Distribución de la resistencia en el horno.....	52
Figura 24. Tanque de vacío.....	55
Figura 25. Diagrama del sistema de vacío.	56
Figura 26. Marco de sujeción y lamina termoplástica.....	57
Figura 27. Mecanismo de movimiento.....	58
Figura 28. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo de movimiento.....	59
Figura 29. Modelo de la estructura con las cargas aplicadas.....	60
Figura 30. Resultado de los esfuerzos que soporta la estructura en Pa	61

Figura 31. Resultado de las deformaciones que sufre la estructura en metros	62
Figura 32. Reacciones obtenidas por la simulación	63
Figura 33. Circuito para el sistema de adquisición de datos	64
Figura 34. Interfaz gráfica del sistema de adquisición de datos	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Temperaturas críticas en el proceso de Termoformado	11
Tabla 2. Especificaciones de material de trabajo	13
Tabla 3. Matriz de ponderación	15
Tabla 4. Carta morfológica	16
Tabla 5. Matriz de decisión del sistema de formado	18
Tabla 6. Matriz de decisión del sistema de calentamiento	19
Tabla 7. Matriz de decisión del sensor de Temperatura.....	20
Tabla 8. Matriz de decisión Adquisición de datos.....	21
Tabla 9. Propiedades de las paredes del horno	31
Tabla 10. Dimensiones y propiedades de perfiles estructurales	44
Tabla 11. Tiempo de calentamiento	49
Tabla 12. Temperatura en las paredes del horno.....	49
Tabla 13. Dimensiones de perfil rectangular	55
Tabla 14. Especificaciones del Resorte	59
Tabla 15. Costo de equipos utilizados.....	67
Tabla 16. Costo de materiales de construcción utilizados.....	68
Tabla 17. Costo de Instrumentación.....	69
Tabla 18. Costo de construcción.....	69
Tabla 19. Costo directo total.....	70
Tabla 20. Costo indirecto total.....	70
Tabla 21. Costo total del proyecto.....	70
Tabla 22. Iteraciones para poliestireno (PS) de 3 mm de espesor.....	78
Tabla 23. Iteraciones para poliestireno (PS) de 2 mm de espesor.....	79
Tabla 24. Iteraciones para poliestireno (PS) de 1.5 mm de espesor.....	80
Tabla 25. Iteraciones para poliestireno (PS) de 1 mm de espesor.....	81
Tabla 26. Iteraciones para polietileno (PE) de 3 mm de espesor	81
Tabla 27. Iteraciones para polietileno (PE) de 2 mm de espesor	83
Tabla 28. Iteraciones para polietileno (PE) de 1.5 mm de espesor	86
Tabla 29. Iteraciones para polietileno (PE) de 1 mm de espesor	87

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1	Partes de la máquina de termoformado
Plano 2	Horno
Plano 3	Horno – Pared exterior
Plano 4	Horno aislante
Plano 5	Horno – Pared interior
Plano 6	Horno - Resistencia
Plano 7	Marco de sujeción
Plano 8	Marco superior
Plano 9	Marco inferior
Plano 10	Mecanismo de movimiento
Plano 11	Mecanismo de movimiento - Palanca
Plano 12	Mecanismo de movimiento – Corredera & Pin
Plano 13	Mecanismo de movimiento – Riel & Rodamientos
Plano 14	Estructura de la máquina
Plano 15	Mesa de vacío
Plano 16	Plancha frontal
Plano 17	Plancha lateral

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los polímeros se han convertido en el sustituto ideal de materiales de ingeniería, dicho material posee propiedades físicas y químicas que facilitan su cambio de forma mediante variaciones de temperatura. Estas características han permitido un avance tecnológico en la industria mediante la innovación y sustitución de materiales.

La industria de los polímeros está en pleno auge y desarrollo, debido a la versatilidad y potencial del material. El cambio de la matriz productiva y otras iniciativas han abierto muchos campos de investigación en el Ecuador, razón por la cual es necesario que los futuros profesionales estén a la altura de los desafíos.

El laboratorio de Polímeros de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), es consciente de dicha necesidad y se ha equipado con instrumentos que permitan al estudiante desarrollar habilidades en identificación y procesos de transformación de polímeros. Sin embargo, no posee un instrumento que recree la técnica del Termoformado.

Como solución se propone el diseño de un instrumento de laboratorio que supla los requerimientos de interacción y retrate correctamente el proceso de Termoformado, así el estudiante estará capacitado para identificar el tipo de procedimiento utilizado según el material a deformar.

El proyecto a presentar necesita de conocimientos en Ciencia de los materiales, Diseño Mecánico, Termodinámica, Transferencia de Calor y Sistemas de Control.

Este documento empieza con la recolección de información pertinente que supla las inquietudes en el desarrollo del tema, a continuación, se estudian las diferentes opciones que ayuden a solucionar el problema, escogida la opción más viable se procede con el diseño de la máquina; finalmente se realizan las conclusiones y recomendaciones pertinentes que dejo el proyecto.

1.1 Descripción del problema

El aprendizaje es la adquisición de conocimiento por medio del estudio, el ejercicio o la experiencia. Lamentablemente la experimentación muchas veces es nula, no abarca bien los contenidos descritos en clase o a veces esta es obsoleta y desactualizada.

La cantidad limitada de recursos en las universidades locales hace que la adquisición de equipos destinados al aprendizaje sea selectiva, por esta razón se descartan muchos equipos en base a la cantidad de prácticas que se puedan realizar, altos costos de importación o mantenimiento.

En el caso del Laboratorio de Polímeros de FIMCP en ESPOL, cuenta con equipos que recrean procesos de transformación de polímeros como extrusión e inyección. Al contrario, no existe un instrumento que experimente con los diferentes tipos de Termoformado; dicha técnica representa cerca del 15% de la producción global de productos plásticos, siendo el método más utilizado en la industria después de la Inyección.

El equipo de Termoformado debe asentar los conocimientos adquiridos en clases, para lograr este objetivo el estudiante debe experimentar con diversos materiales con distintas dimensiones.

El diseño de esta máquina parte desde la correcta selección de métodos de calentamiento y fuerzas de formado, además de controlar variables

como la temperatura de calentamiento y tiempo de exposición según el material utilizado.

Todos estos sistemas deben coexistir en la máquina de Termoformado para obtener un instrumento de laboratorio didáctico y amigable con el entorno del estudiante.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Diseñar una máquina de Termoformado para laboratorio con fines didácticos, que permita la lectura de variables como temperatura y tiempo de exposición de las láminas termoplásticas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Establecer las dimensiones promedio de las láminas a utilizar.
- Especificar los materiales termoplásticos con los que la máquina de Termoformado trabaja.
- Seleccionar un sistema de calentamiento adecuado para los fines didácticos.
- Diseñar un sistema óptimo para la deformación de las láminas.
- Diseñar la estructura, mecanismo de sujeción y movimiento de la lámina.
- Diseñar el sistema de control de temperatura de la máquina de Termoformado.
- Realizar simulación del sistema de control empleado en la máquina.
- Realizar el modelo 3D de la máquina de Termoformado.
- Elaborar un procedimiento experimental para el correcto uso de la máquina.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Polímeros

Los polímeros son materiales de ingeniería de origen orgánico. Según su nombre científico proviene de las palabras griegas 'polys' que significa mucho y 'meros', lo que indica una sucesión de elementos iguales como se observa en la figura 1.

Los polímeros se originan mediante largas cadenas de moléculas iguales que están unidas por enlaces covalentes, al final estos arreglos se unen entre si formando una macromolécula más compleja. Dichos grupos de átomos o moléculas se pueden combinar entre sí para definir un arreglo característico. Estos arreglos influyen directamente en las propiedades y comportamiento de dichos materiales.

En el presente documento se utilizan los términos plástico y polímero de manera intercambiable, ya que tienen el mismo significado (Phulé, 2004).

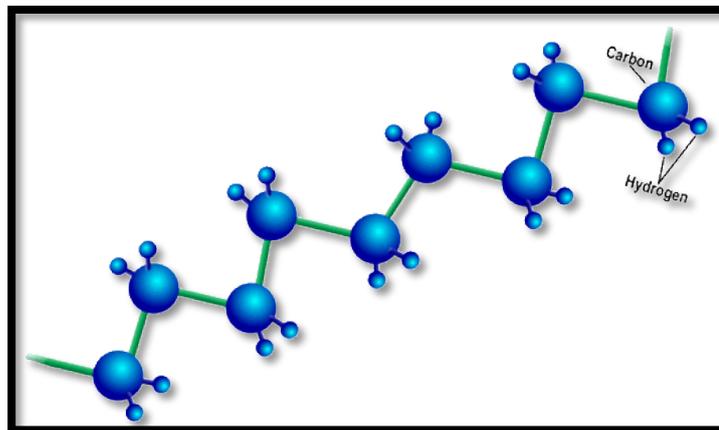


Figura 1. Cadena molecular de Polietileno de alto modulo.

Fuente: (Phulé, 2004)

Se presenta la clasificación de los polímeros según el comportamiento del material al deformarse (Phulé, 2004):

- Termoplásticos. Están compuestos por cadenas lineales flexibles, dicho material tiene la facilidad de ablandarse y fundirse ante un incremento de temperatura. Esta propiedad permite que se pueda cambiar de forma fácilmente manteniendo sus propiedades mecánicas intactas. Ejemplo: Polietileno.
- Termoestables. son formados por redes tridimensionales rígidas, al calentarse dicho material se ablanda y se puede deformar, sin embargo, el calor desencadena reacciones químicas que lo harán rígido permanentemente y no permite que el material vuelva a fundirse. Ejemplo: Poliuretano.
- Elastómeros. Son cadenas de termoplásticos y termoestables entrelazados entre sí, este material tiene alta deformación elástica. Ejemplo: Hule natural.

1.3.2 Efecto de la temperatura en los termoplásticos.

Los polímeros termoplásticos son adecuados para el proceso de Termoformado, estos al calentarse presentan variaciones en sus propiedades mecánicas que permiten moldear su forma, al enfriarse dichas propiedades mecánicas regresan a su estado inicial.

La unión de estas moléculas se realiza mediante enlaces de Van Der Wall, dichos enlaces se desenrollan ante un incremento de temperatura, lo que ocasiona que las cadenas deslicen entre sí. El polímero se deforma sin mayor fuerza aplicada, pero al disminuir la temperatura estos enlaces se restituyen por lo que las cadenas se vuelven a entrelazar y regresan a su comportamiento rígido. Este comportamiento se observa en la figura 2.

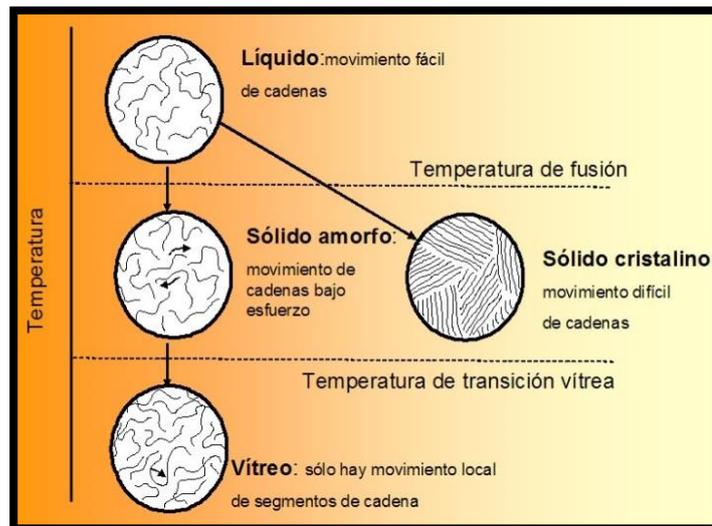


Figura 2. Estructura molecular del polímero en relación a su temperatura

Fuente: (Phulé, 2004)

Al enfriarse un termoplástico puede ser cristalino o amorfo. Los cristalinos tienen una estructura molecular ordenada, tiene altas propiedades mecánicas, por lo que son más resistentes a la deformación, son sólidos opacos. A diferencia de los amorfos cuya distribución es similar a un manojo de hilos desordenados, lo que permite su fácil deformación, estos son sólidos transparentes.

1.3.3 Termoformado

El termoformado es un proceso que consiste en calentar un material termoplástico en forma de lámina, hasta su temperatura de formado, para conseguir que la misma se vuelva flexible y pueda adquirir la forma deseada mediante la aplicación de presión contra los contornos de un molde.

Se debe agregar que el termoformado consta de dos etapas principales: calentamiento y formado de la lámina. En la primera etapa, la lámina, generalmente, es calentada a través de radiadores eléctricos.

El tiempo de calentamiento debe ser cuidadosamente seleccionado para alcanzar a reblandecer la lámina sin llegar a fundirla, considerando parámetros como el material y sus dimensiones.

En cuanto a la segunda etapa, formado de la lámina, se tiene tres grupos: Formado al vacío, formado a presión y formado mecánico.

1.3.3.1 Termoformado al vacío

Se usa presión de aire negativa para ejercer fuerza sobre el plástico, de tal manera que el mismo quede adherido sobre los contornos del molde o perfil.

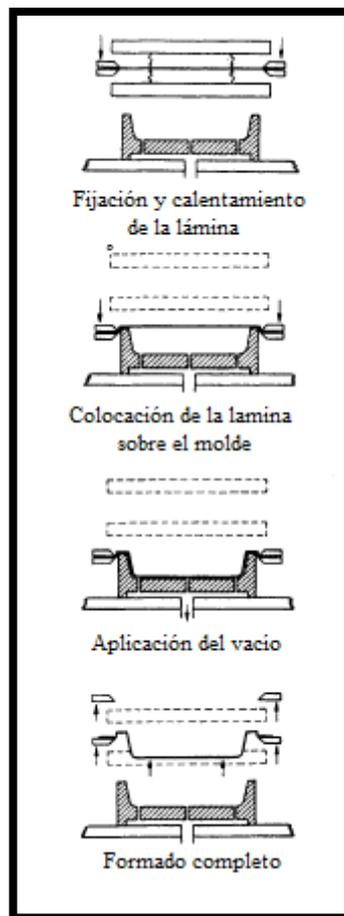


Figura 3. Termoformado al vacío

Fuente: (Society of the Plastics Industry, 1991)

1.3.3.2 Termoforado a presión

En este método se aplica presión de aire positiva, sobre la lámina precalentada, para forzarla a adquirir la forma de un molde hembra. Este formado por presión ofrece ciclos de producción más rápidos, además de ser una alternativa diferente al formado por vacío, el cual se limita al máximo teórico de una atmosfera.

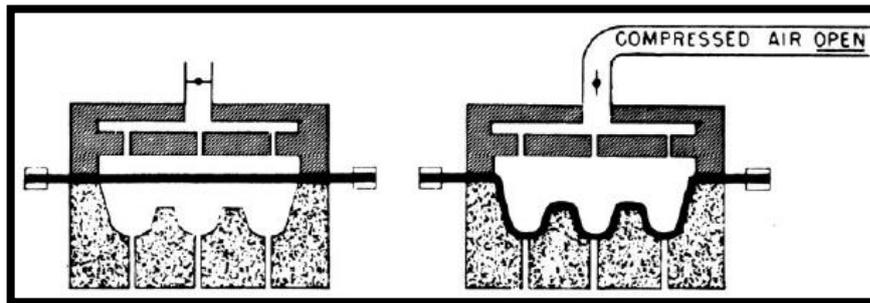


Figura 4. Termoforado a presión

Fuente: (Society of the Plastics Industry, 1991)

1.3.3.3 Termoforado mecánico

El termoforado mecánico es un método que no utiliza presión de aire ni vacío para dar la forma deseada a la lámina de plástico. Para ello se utilizan dos moldes adaptados (positivo y negativo), que se colocan sobre el termoplástico para luego ser cerrados, forzando a la hoja a adquirir los detalles del contorno de ambos moldes. El espesor del producto final está dado por la separación entre los moldes.

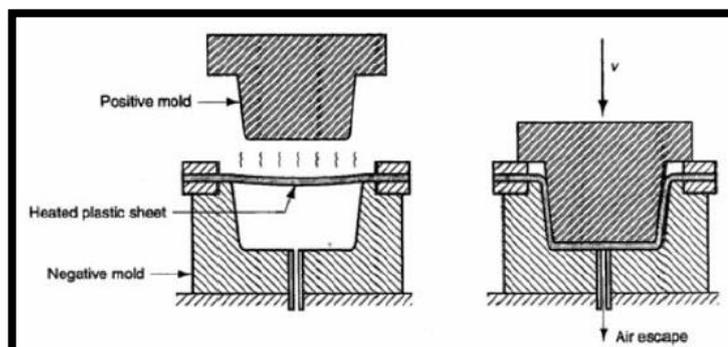


Figura 5. Termoforado mecánico

Fuente: (Society of the Plastics Industry, 1991)

1.3.4 Técnica de termoformado

A breves rasgos, la técnica de termoformado consiste en:

- a) Colocar la lámina u hoja de plástico termo-deformable en un marco que servirá para sujetar el material durante todo el proceso.
- b) Calentar la lámina por medio de suministro de calor, sin llegar al punto de fusión, de modo que quede reblandecida y pueda ser deformada.
- c) Forzar la lámina caliente contra la superficie del molde para adquirir la forma deseada
- d) Realizar el corte de la pieza final obtenida.

1.3.4.1 Fijación de la lámina

En esta primera etapa, la lámina termoplástica debe sujetarse de algún modo para iniciar el proceso de termoformado. Para esto se debe contar con un marco que permita sujetar el material a deformar y debe ser capaz de desplazarse, de modo que se pueda trasladar la lámina a través de las distintas etapas del termoformado.

1.3.4.2 Calentamiento de la lámina

La segunda etapa del termoformado consiste en calentar la lámina u hoja termoplástica hasta lograr que esta se reblandezca para su posterior formado. Algunas de las formas más comunes de calentamiento son:

Por contacto, que consiste en colocar la lámina de termoplástico en contacto directo con una placa caliente.

Por convección, el cual consta de un horno donde fluye aire caliente que permite una distribución uniforme del calor a lo largo de la lámina.

Por radiación, donde se produce un intercambio de energía entre la superficie caliente (calentador) y fría (lámina). La energía emitida debe coincidir con las características de absorción del plástico para lograr reblandecerlo.

1.3.4.3 Formado de la lámina

En esta tercera etapa se le da la forma requerida a la lámina precalentada. Para esto, el termoplástico es sometido contra los contornos del molde con el fin de que adopte la configuración del mismo y así obtener la pieza deseada.

1.3.5 Temperaturas importantes en el proceso de Termoformado

La variable temperatura de la lámina en un proceso de Termoformado es determinante, según la región donde se encuentre el procedimiento puede o no llevarse a cabo. A continuación, se presentan las que se consideran importantes.

Temperatura de transición vítrea. Es la temperatura que empieza el comportamiento elástico del material, en este rango las cadenas moleculares empiezan a moverse entre sí, permitiendo que el material sea fácil de deformar.

Temperatura de Termoformado. Depende directamente del material, dicha temperatura debe ser alcanzada por el centro de la lámina, debido a esto, se escoge un rango de valores donde se asegura la deformación mediante Termoformado.

Temperatura de degradación. Ante un aumento exagerado de temperatura los enlaces debilitados se destruyen. El material polímero se quema y es imposible regresar a su estado original.

Se observa en la tabla 1 los valores representativos de dicha temperatura.

Tabla 1. Temperaturas críticas en el proceso de Termoformado

Material	Cristalinidad (%)	Temperatura transición vítrea (°C)	Temperatura Termoformado (°C)	Temperatura degradación (°C)
Poliétileno de alta densidad	95	-125	145 – 190	335-450
Polipropileno	65	-20	145 – 200	328-410
Poliestireno	Baja	>80	140 – 170	300-400
Polivinilo de Cloruro	5-15	80-85	135 – 175	200-300
Polycarbonato	Baja	145 - 150	180 – 230	420-620

Fuente: (Plastigas de Mexico, S.A. de C.V., 2012)

1.3.6 Parámetros a evaluar en piezas producto del Termoformado

Para la elaboración de un producto, que utilice el proceso de transformación de Termoformado, es necesario repasar ciertos parámetros que van a influir en la calidad del producto final. Estos son:

Espesor del producto final. El material termo-deformable tiende a fluir ante elevada temperatura, es común que el material sea removido en dirección de fuerzas aplicadas. Por lo tanto, existen regiones en la cual se concentra el material, a diferencia de otras donde es escaso, dicha distribución se refleja en el espesor del objeto como se observa en la figura 6.

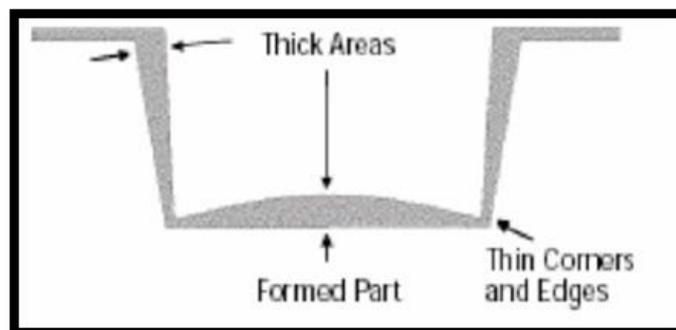


Figura 6. Distribución de espesores en pieza final.

Fuente: (Throne, 1996)

Acabado superficial. Dependen de la técnica utilizada, si se requiere un mejor acabado superficial externo es recomendable que se aplique aire a presión al objeto moldeado, caso contrario si la apariencia de la superficie interna es importante se requiere de una fuerza de succión. Dichas diferencias se observan en la figura 7.

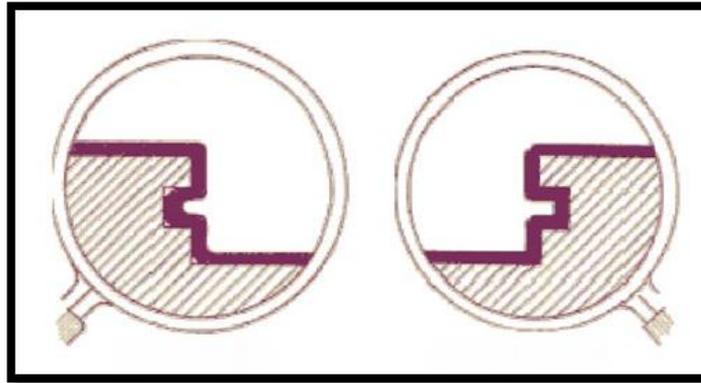


Figura 7. Acabado superficial de un sistema de vacío (izq.) y un sistema de presión (der.)

Fuente: (MULTIFAB INCORPORATED, 2009)

En base a toda la información recopilada, se procede a la selección de las mejores alternativas en el diseño de la máquina de Termoformado.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

El diseño de la máquina de termoformado consiste básicamente en establecer dos sistemas principales, los cuales son: sistema de calentamiento y sistema de formado. Ambos, expuestos en el capítulo 1, se pueden configurar de distintas formas, las cuales serán evaluadas en una matriz de decisión con el objetivo de seleccionar la mejor configuración.

2.1 Requerimientos de diseño

Los requerimientos de diseño se encuentran se encuentran ligados al hecho de que la máquina funcionará dentro de un laboratorio.

- ✓ Debe ser segura ya que estará en contacto con estudiantes.
- ✓ Debe ser didáctica para sentar, con facilidad, los conceptos del termoformado.
- ✓ Debe ser compacta, de modo que ocupe poco espacio físico dentro del laboratorio.
- ✓ Debe ser un diseño económico.

Se requiere que la máquina trabaje con termoplásticos, cuyas especificaciones se observan en la tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones de material de trabajo

Material:	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Poliestireno (PS)
Temperatura de formado (°C):	145 -190	140 – 170
Espesor (mm):	1 – 3	
Dimensión de la lámina (mm):	300 x 300	

Fuente: Elaboración propia

2.2 Criterios de diseño

En base a los requerimientos de diseño, se han planteado los siguientes criterios de diseño.

- ✓ **Seguridad:** Se refiere a las condiciones de seguridad que brinda el equipo, en cuanto a la prevención y limitación de posibles accidentes.
- ✓ **Didáctico:** Se refiere a la facilidad de enseñanza y aprendizaje del concepto de termoformado para el estudiante.
- ✓ **Costo:** Se refiere al valor monetario requerido desde la adquisición de la materia prima hasta la puesta en marcha del equipo.
- ✓ **Operatividad:** Se refiere a la facilidad que brinda el equipo para su uso.
- ✓ **Mantenimiento:** Facilidad para realizar actividades de mantenimiento preventivo o correctivo.
- ✓ **Tamaño:** Al ser un equipo para laboratorio, se requiere que ocupe el menor espacio físico posible.

Estos criterios brindan la pauta para la selección de la mejor alternativa de diseño, estas serán evaluadas mediante una matriz de decisión.

2.3 Ponderación de criterios

Para establecer una calificación adecuada a cada criterio, se realiza una matriz de ponderación como se observa en la tabla 3, en esta se establece la importancia de cada criterio en el diseño de la máquina. Dichos criterios son comparados entre sí para obtener el peso de cada uno.

Tabla 3. Matriz de ponderación

Matriz de ponderación	Seguridad	Didáctico	Costo	Operatividad	Mant.	Tamaño	Total Criterios	Ponderación	Ponderación (%)
Seguridad	1,00	1,11	1,25	1,33	1,43	2,00	8,12	0,22	22%
Didáctico	0,90	1,00	1,13	1,20	1,29	1,80	7,31	0,19	19%
Costo	0,80	0,89	1,00	1,07	1,14	1,60	6,50	0,17	17%
Operatividad	0,75	0,83	0,94	1,00	1,07	1,50	6,09	0,16	16%
Mant.	0,70	0,78	0,88	0,93	1,00	1,40	5,69	0,15	15%
Tamaño	0,50	0,56	0,63	0,67	0,71	1,00	4,06	0,11	11%
Suma total							37,77	1,00	100%

Fuente: Elaboración propia

El peso del criterio seguridad es 22%, siendo este el criterio con mayor importancia ya que se requiere una máquina segura, de modo que el bienestar de la integridad física de los estudiantes, sea primordial.

El criterio didáctico obtuvo 19% del peso total, representando el segundo criterio con mayor importancia. Este equipo para laboratorio debe ser lo más explícito posible, así el estudiante logra comprender lo estudiado previamente en clases.

El costo obtuvo un valor del 17% del peso total, se refiere al equipo que presente el diseño más económico entre todas las alternativas.

La operatividad del equipo tiene un peso de 16%, el equipo que brinde la mayor facilidad para su operación, obtiene la máxima calificación.

El mantenimiento es calificado sobre el 15% del peso total, donde el equipo que represente la menor cantidad de trabajos de mantenimiento obtiene la máxima calificación.

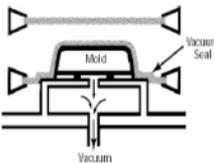
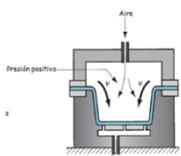
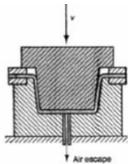
Finalmente, el tamaño representa el 11% del peso total, donde el equipo que ocupe el menor espacio físico obtiene la mayor puntuación.

2.4 Alternativas propuestas

Para un mejor diseño de la máquina de termoformado, se han evaluado las alternativas de diseño para cada sistema que conforma la máquina. Estas alternativas se presentan en la siguiente carta morfológica, que se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Carta morfológica

Fuente: Elaboración propia

Sistema	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
De formado	 <p>Por vacío Fuente: Termoformado, Andrés Rigail, 2016.</p>	 <p>Por presión positiva Fuente: Termoformado, Andrés Rigail, 2016.</p>	 <p>Mecánico Fuente: Termoformado, Andrés Rigail, 2016.</p>
De calentamiento	 <p>Por contacto (Conducción) Fuente: TECNODALVO, 2016</p>	 <p>Horno de convección Fuente: Blasdel, 2013</p>	 <p>Por radiación Fuente: Workshop Publishing</p>
De control de temperatura	 <p>Cámara termo-gráfica Fuente: ACRA, 2016</p>	 <p>Termopar K Fuente: Rosemount, 2016</p>	 <p>DTH22 Fuente: Ardbot, 2016</p>

<p>De adquisición de datos</p>	 <p>PLC S7-1200 Fuente: Siemens, 2016</p>	 <p>Tarjeta Adquisición de Datos (DAQ) Fuente: National Instruments, 2010</p>	 <p>Arduino UNO Fuente: ARDUINO, 2016</p>
---------------------------------------	--	---	--

Las alternativas de diseño, para cada sistema, serán evaluadas en base a los criterios de diseño en una matriz de decisión.

2.5 Selección de alternativas

Una vez conocidos los pesos ponderados de cada criterio de evaluación y alternativas de diseño, se procede a seleccionar las mejor alternativas. Para evaluar las alternativas en base a los criterios, se ha establecido la siguiente puntuación:

- 0: Malo;
- 1: Regular;
- 2: Bueno;
- 3: Muy bueno; y,
- 4: Excelente.

Estos valores serán denominados como “Evaluación” dentro de la matriz de decisión y se los multiplica por el peso ponderado de cada criterio. La puntuación más alta será escogida como la alternativa ganadora.

2.5.1 Sistema de formado

Para el sistema de formado, se tienen las alternativas de:

- ✓ Presión
- ✓ Vacío
- ✓ Mecánico

En la tabla 5 se puede observar la matriz de decisión de este sistema.

Tabla 5. Matriz de decisión del sistema de formado

Matriz de decisión		Ponderación	Alternativas de Formado					
			Presión		Vacío		Mecánico	
			Evaluación	Pond. * Ev.	Evaluación	Pond. * Ev.	Evaluación	Pond. * Ev.
Criterios	Seguridad	22%	3	0,65	3	0,65	2	0,43
	Didáctico	19%	3	0,58	3	0,58	4	0,77
	Costo	17%	3	0,52	3	0,52	1	0,17
	Operatividad	16%	3	0,48	4	0,65	2	0,32
	Mantenimiento	15%	2	0,30	3	0,45	2	0,30
	Tamaño	11%	2	0,22	3	0,32	2	0,22
TOTAL		100%	19	0,75	19	3,16	13	2,22

Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Sistema de calentamiento

Para el sistema de calentamiento, se tienen las alternativas de:

- ✓ Contacto directo
- ✓ Horno de convección
- ✓ Radiación

En la tabla 6 se puede observar la matriz de decisión de este sistema.

Tabla 6. Matriz de decisión del sistema de calentamiento

Matriz de decisión		Ponderación	Alternativas de Calentamiento					
			Contacto directo		Horno de convección		Radiación	
			Evaluación	Pond. * Ev.	Evaluación	Pond. * Ev.	Evaluación	Pond. * Ev.
Criterios	Seguridad	22%	1	0,22	2	0,43	3	0,65
	Didáctico	19%	2	0,39	3	0,58	3	0,58
	Costo	17%	2	0,34	1	0,17	4	0,69
	Operatividad	16%	2	0,32	2	0,32	3	0,48
	Mantenimiento	15%	2	0,30	3	0,45	4	0,60
	Tamaño	11%	2	0,22	2	0,22	4	0,43
TOTAL		100%	11	1,78	13	2,17	21	3,43

Fuente: Elaboración propia

2.5.3 Sensor de temperatura

Para el sensor de temperatura, se tienen las alternativas de:

- ✓ Cámara termográfica
- ✓ Termopar K
- ✓ DTH 22

En la tabla 7 se puede observar la matriz de decisión de este sensor.

Tabla 7. Matriz de decisión del sensor de Temperatura

Matriz de decisión		Ponderación	Alternativas de Sensor de Temperatura					
			Cámara termográfica		Termopar K		DTH 22	
			Evaluación	Pond. * Ev.	Evaluación	Pond. * Ev.	Evaluación	Pond. * Ev.
Criterios	Seguridad	22%	4	0,86	3	0,65	3	0,65
	Didáctico	19%	4	0,77	3	0,58	0	0
	Costo	17%	1	0,17	4	0,69	4	0,69
	Operatividad	16%	4	0,65	3	0,48	0	0
	Mantenimiento	15%	-	-	-	-	-	-
	Tamaño	11%	1	0,11	2	0,22	4	0,44
TOTAL		100%	14	2,56	15	2,61	11	1,78

Fuente: Elaboración propia

2.5.4 Sistema de adquisición de datos

Para el sistema de adquisición de datos, se tienen las alternativas de:

- ✓ PLC S7 - 1200
- ✓ DAQ
- ✓ Arduino

En la tabla 8 se puede observar la matriz de decisión de este sistema.

Tabla 8. Matriz de decisión Adquisición de datos

Matriz de decisión		Ponderación	Alternativas de Adquisición de datos					
			PLC S7 - 1200		DAQ		Arduino	
			Evaluación	Pond. * Ev.	Evaluación	Pond. * Ev.	Evaluación	Pond. * Ev.
Criterios	Seguridad	22%	4	0,86	4	0,86	4	0,86
	Didáctico	19%	2	0,39	3	0,58	4	0,77
	Costo	17%	1	0,17	2	0,34	4	0,69
	Operatividad	16%	3	0,48	3	0,48	3	0,48
	Mantenimiento	15%	-	-	-	-	-	-
	Tamaño	11%	1	0,11	3	0,32	4	0,43
TOTAL		100%	11	2,01	15	2,59	19	3,24

Fuente: Elaboración propia

2.6 Consideraciones específicas

El equipo de Termoformado consiste de algunos sistemas de trabajo, dichos sistemas se pueden configurar de diferentes maneras según los requerimientos establecidos.

Fuente de Calentamiento. Se realiza el calentamiento mediante resistencias eléctricas tubulares colocadas en un horno, estas deben aumentar la temperatura de la lámina termoplástica hasta su temperatura de formado.

Sistema de Vacío. Para el formado de la pieza es necesario un sistema conformado por una bomba de vacío, tanque acumulador de vacío, mangueras neumáticas e instrumentación necesaria.

Estructura de la máquina. Al ser un equipo de Laboratorio, la estructura debe ser de dimensiones acordes a su aplicación, sin descuidar una correcta distribución de fuerzas en el mismo.

Mecanismo de movimiento. La lámina previamente calentada debe ser trasladada al sitio de deformación sin contacto humano, para lo cual se necesita de un mecanismo de movimiento que se accione mediante el movimiento más simple posible.

Sistema de Control. El sistema de control es de tipo retroalimentado, donde la temperatura censada será comparada con la temperatura de formado del material, e indicara cuando es el momento adecuado de realizar la deformación. Estas mediciones deben ser fácilmente identificadas por el estudiante.

2.7 Esquema de metodología de diseño

El diseño del equipo de Termoformado parten del material y espesor de lámina a deformar, en base a estos parámetros se limita las funciones del equipo y se empieza a constituir en sistema de calentamiento y sistema de vacío.

Una vez diseñado estos, se dispone del espacio físico disponible para la estructura, a la par se desarrolla el mecanismo de movimiento de la lámina, por último, se implementa un sistema de control y adquisición de datos para la variable temperatura, dichos procedimientos se observan en la figura 8.

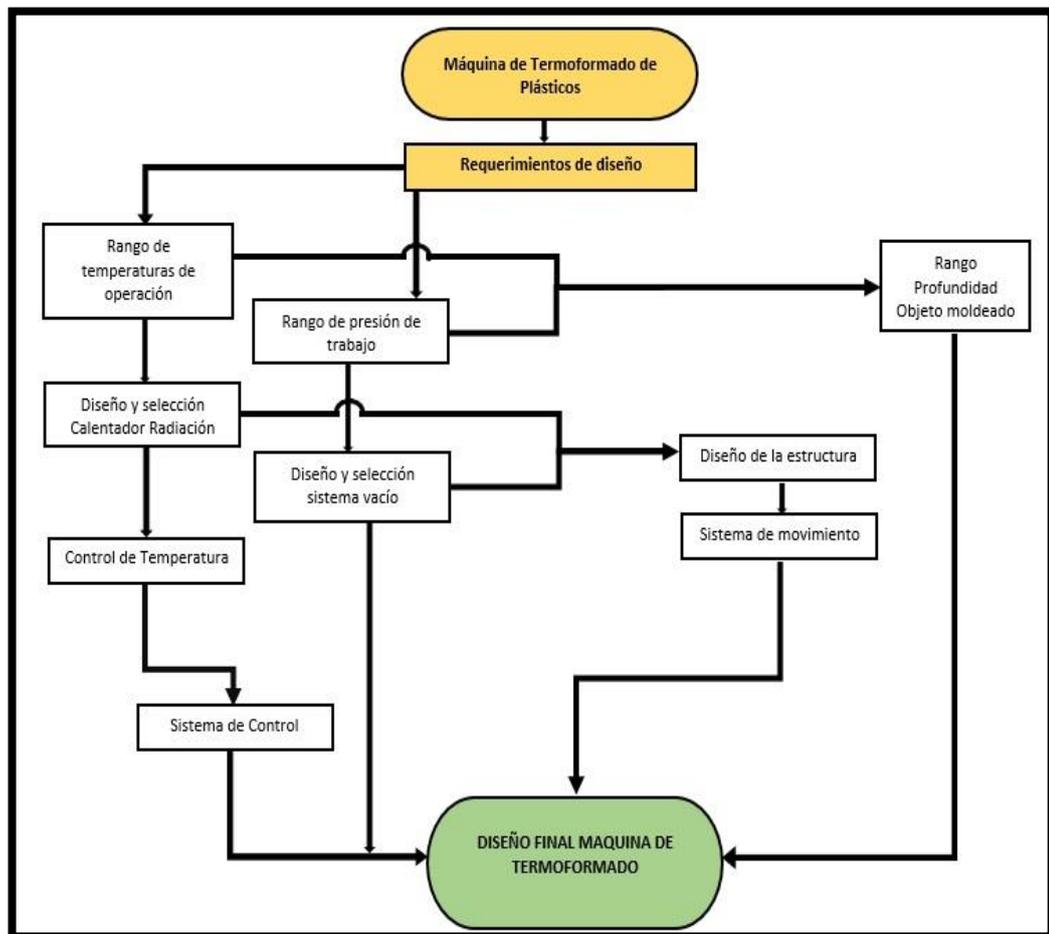


Figura 8. Esquema de metodología de diseño

Fuente: Elaboración propia.

2.8 Diseño Conceptual

El funcionamiento de la máquina se estructura en el funcionamiento de los calentadores, que incrementan la temperatura de la lámina termoplástica hasta una temperatura de deformación.

Seguido de esto, mediante un sistema de movimiento se empuja el plástico en estado viscoso contra un molde tipo macho; el volumen de aire entre la lámina deformada y el molde es removido mediante una presión de vacío, proporcionada por el sistema de vacío.

De esta manera el termoplástico adquiere la forma del molde, donde la variable más importante a controlar es la temperatura, este funcionamiento se observa en el esquema a continuación.

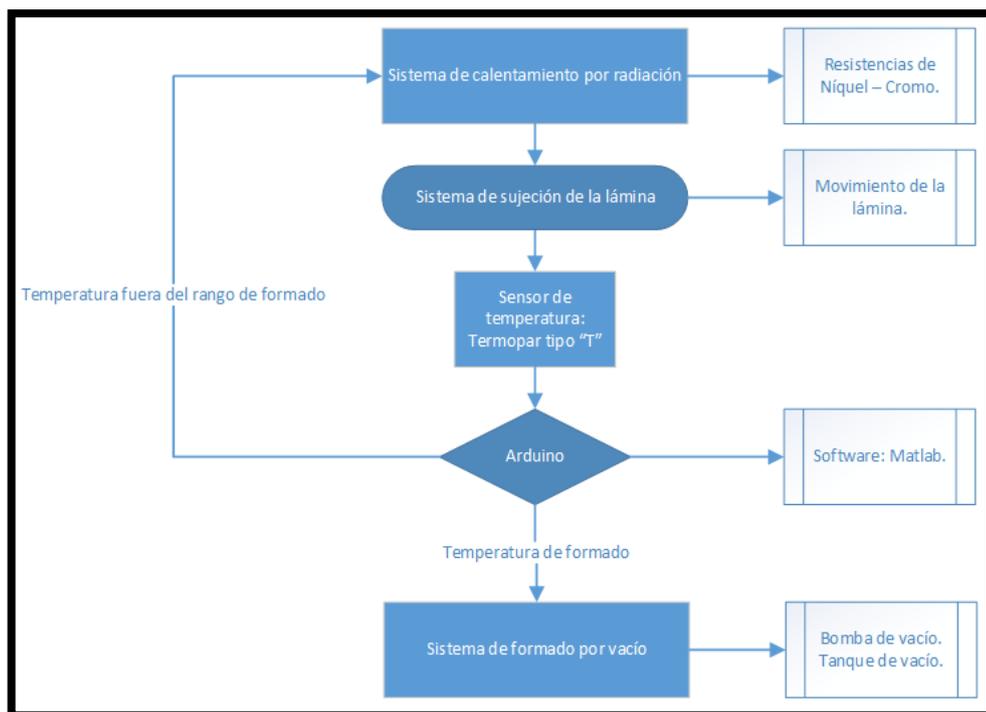


Figura 9. Esquema de diseño conceptual

Fuente: Elaboración propia

2.9 Diseño del sistema de calentamiento

Como se ha mencionado en el capítulo 1, para termo deformar las láminas, es necesario calentarlas hasta su temperatura de formado y para

ello, se ha propuesto seleccionar un sistema de calentamiento por radiación. Una vez seleccionado el calentador por radiación, se procede a establecer el tiempo de exposición de las láminas según sus características y dimensiones.

Conforme con los requerimientos de diseño (ver tabla 2), el calentador deberá ser capaz de elevar la temperatura de láminas de polietileno y de poliestireno a un rango de 145 a 190 y 140 a 170 °C respectivamente.

Para el análisis de transferencia de calor entre el calentador y la lámina, se consideran los efectos de la radiación incidente del calentador sobre la lámina. Además, se asume condiciones de estado cuasi estable y que el calentador y las láminas son cuerpos grises.

La superficie del calentador y la lámina se encuentran conectadas mediante una superficie rerradiante lo cual impide que la radiación emitida por el calentador se pierda a los alrededores; por el contrario, hace que la radiación incidente sobre estas superficies sea reflejada sobre la lámina lo cual mejora la transferencia de calor. En la figura 10 se puede observar un esquema del calentador, superficie rerradiante y la lámina.

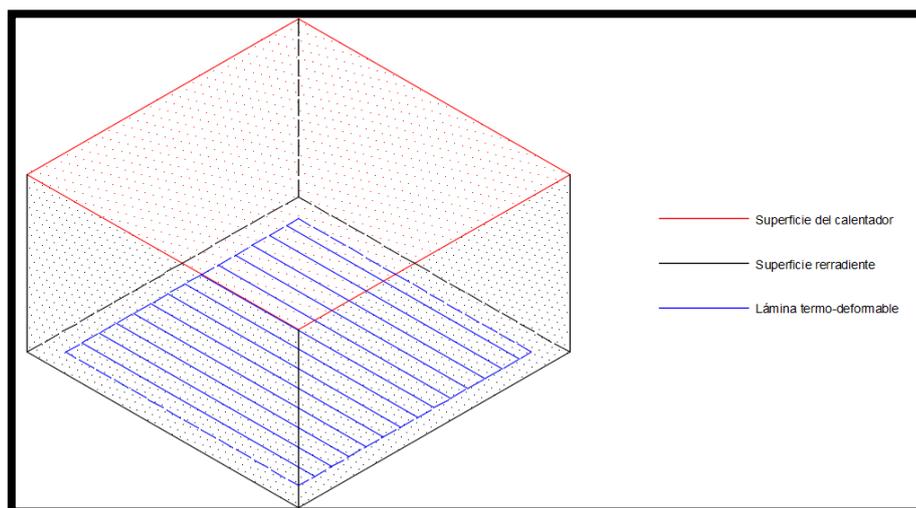


Figura 10. Esquema del sistema de calentamiento

Fuente: Elaboración propia

2.9.1 Análisis de transferencia de calor entre el calentador y la lámina

Se desea elevar la temperatura de la lámina desde su temperatura ambiente, T_a , hasta su temperatura de formado, T_b . Para ello es necesario conocer la energía requerida para lograr este gradiente de temperatura, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$Q_L = \frac{m_L * C_p * (T_b - T_a)}{\Delta t} \quad (\text{Ecuación 2. 1})$$

Donde m_L es la masa de la lámina a calentar, C_p es el calor específico de la lámina, T_b es la temperatura de formado de la lámina, T_a es la temperatura inicial de la lámina (en condiciones normales, sería la temperatura ambiente) y Δt es el tiempo de exposición de la lámina al calentamiento.

El flujo de calor que recibe la lámina, proveniente del calentador, puede definirse como el calor radiante emitido por un cuerpo gris que fluye a través de un recinto cerrado formado por dos superficies grises conectadas mediante una superficie rerradiante. Este flujo de calor se lo puede determinar mediante la ecuación 2.2 (Frank Kreith, 2011), a continuación.

$$Q_{1 \rightarrow 2} = A_1 F_{12} * \sigma * (T^4 - T_{\text{prom-lamina}}^4) \quad (\text{Ecuación 2. 2})$$

Donde $Q_{1 \rightarrow 2}$ es el calor radiante emitido por el calentador hacia la lámina termoplástica, σ representa la constante de Stefan-Boltzman, T es la temperatura del calentador y $T_{\text{prom-lamina}}$ es la temperatura promedio de la lámina.

El término $A_1 F_{12}$ presente en la ecuación 2.2, representa la conductancia total existente entre las dos superficies grises conectadas mediante una superficie rerradiante. En la figura 11 se puede observar el circuito análogo para la configuración antes mencionada.

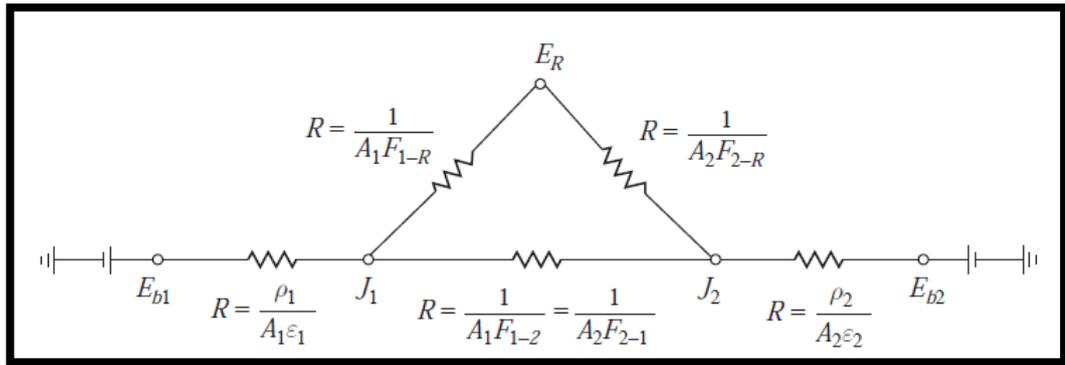


Figura 11. Circuito análogo para un recinto de dos superficies grises conectados por una superficie re-radiante

Fuente: (Frank Kreith, 2011)

Este circuito análogo involucra las potencias emisoras de cuerpo negro del calentador y de la lámina, E_{b1} y E_{b2} respectivamente; potencia emisora de la superficie rerradiante E_R , radiosidad del calentador y de la lámina, J_1 y J_2 respectivamente; emitancia del calentador y de la lámina ϵ_1 y ϵ_2 respectivamente. El área del calentador y de la lámina están denotadas por A_1 y A_2 respectivamente, mientras que F_{1-2} representa el factor de visión entre el calentador y la lámina, F_{1-R} el factor de visión entre el calentador y la superficie rerradiante y F_{2-R} el factor de visión entre la lámina y la superficie rerradiante. El termino $A_1 F_{12}$ esta dado por la ecuación 2.3, a continuación.

$$A_1 F_{12} = \frac{1}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 * A} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 * A} + \frac{1}{A * \left[\frac{F_{1-2}}{2} \right]}} \quad (\text{Ecuación 2. 3})$$

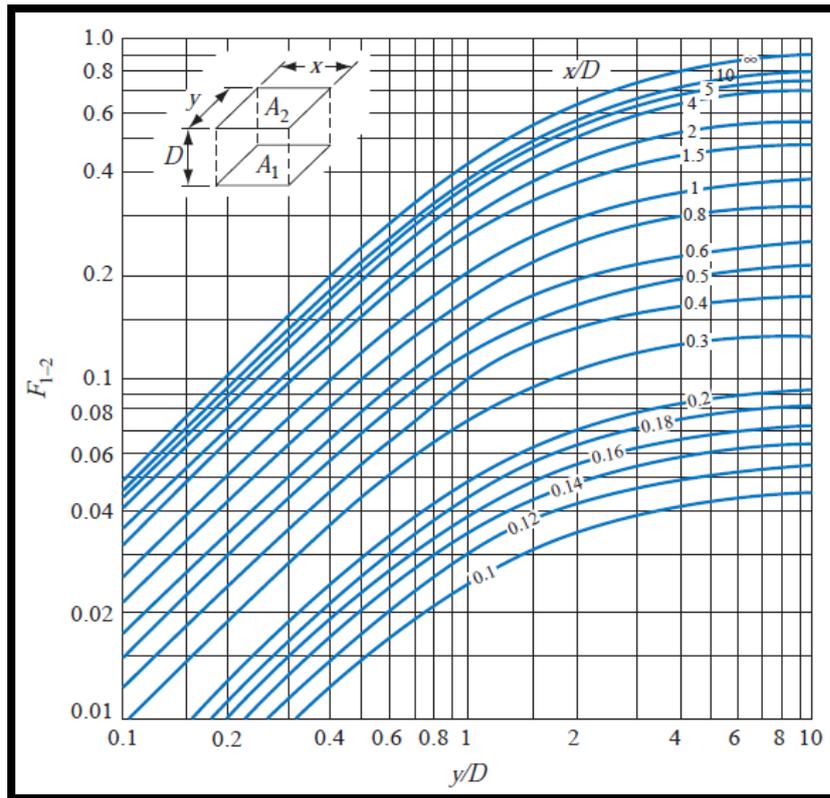


Figura 12. Factor de forma para superficies rectangulares opuestas

Fuente: (Frank Kreith, 2011)

El factor de forma (o factor de visión) entre el calentador y la lámina se lo puede obtener de la figura 12. Se deben ingresar los valores de las dimensiones del calentador (o lámina) y la distancia de separación entre ambos para obtener el valor correspondiente al factor de visión entre ambas superficies.

2.9.2 Tiempo de exposición de las láminas al calentamiento

Al realizar un balance de energía sobre la lámina, se puede determinar el tiempo de exposición de la lámina con la ecuación 2.4.

$$\frac{m_L * C_p * (T_{i+1} - T_i)}{\Delta t} = A_1 F_{12} * \sigma * \left[T^4 - \left(\frac{T_{i+1} + T_i}{2} \right)^4 \right] \quad (\text{Ecuación 2. 4})$$

Donde T_i es la temperatura de la lámina en el instante inicial y T_{i+1} es la temperatura de la lámina después de un pequeño instante de tiempo Δt .

Para determinar el tiempo de exposición de la lámina al proceso de calentamiento, se calcula la temperatura T_{i+1} para un determinado Δt . Este es un proceso iterativo donde la primera corrida se la realiza con $T_i = T_a$ obteniendo un valor para T_{i+1} el cual servirá para la siguiente corrida como T_i y se realiza hasta que el valor de T_{i+1} alcance el valor de T_b .

2.9.3 Temperaturas en las paredes del horno

Parte del calor emitido por el calentador se propaga a través de las paredes del horno. Si se considera este flujo de calor en estado estable, el mismo será igual a través de todas las paredes del horno, siempre y cuando exista un buen contacto entre las superficies. En la figura 13 se puede observar un esquema de las paredes del horno.

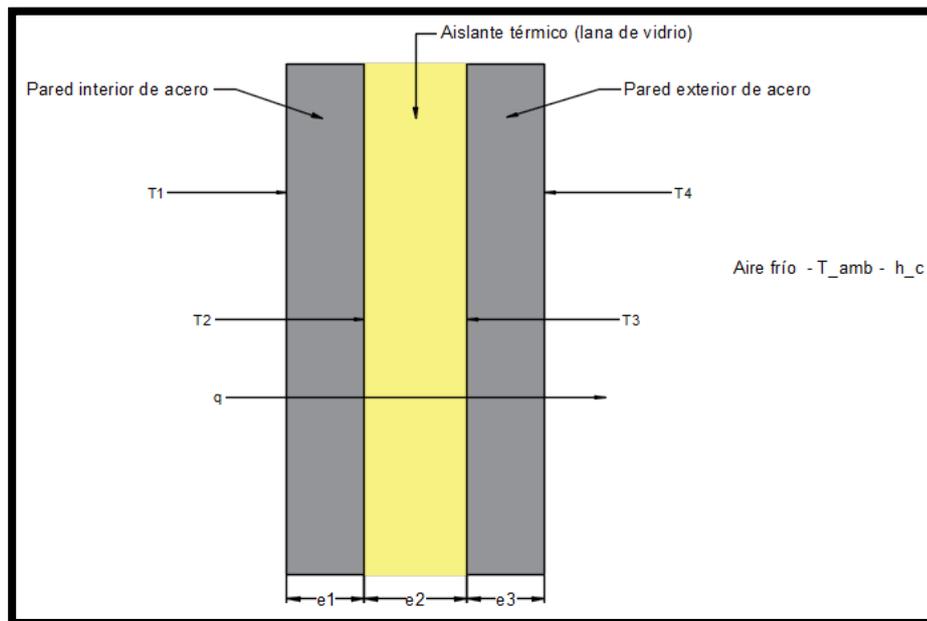


Figura 13. Esquema de las paredes del horno y sus temperaturas

Fuente: Elaboración propia

T_1 es la temperatura de la pared al interior del horno, T_2 es la temperatura de la cara interior del aislante, T_3 es la temperatura de la cara exterior del aislante, T_4 es la temperatura de la pared exterior del horno y T_{amb} se refiere a la temperatura ambiente. Los espesores de la pared interior, aislante y pared exterior son e_1 , e_2 y e_3 respectivamente.

Debido a que el equipo será para uso de laboratorio, la temperatura recomendada para la pared exterior del horno es de 50°C de acuerdo a la norma NTE INEN-ISO 13732-1.

La temperatura exterior se ha tomado de acuerdo al caso más crítico, donde se asume que el laboratorio está a 16°C asumiendo que el aire acondicionado este encendido a su máxima capacidad. Además, se asume que la pared interior del horno se encuentra a la misma temperatura del calentador 450°C (caso crítico).

El flujo de calor a través de las paredes del horno está dado por la ecuación 2.5 (Incropera, 1999).

$$q = \frac{T_4 - T_{amb}}{h_c * A_{wall}} \quad (\text{Ecuación 2. 5})$$

Donde h_c se refiere al coeficiente de convección y A_{wall} se refiere al área de la pared. Este coeficiente de convección se lo puede determinar mediante correlaciones apropiadas como se verá más adelante, en la sección de pérdidas por convección.

Una vez que se ha determinado el flujo de calor a través de las paredes del horno, se puede determinar la temperatura de la superficie exterior del aislante (o superficie interior de la pared exterior del horno) T_3 mediante la ecuación 2.6.

$$q = \frac{T_3 - T_4}{\frac{e_3}{k_{steel} * A_{wall}}} \quad (\text{Ecuación 2. 6})$$

Donde e_3 se refiere al espesor de la pared exterior del horno y k_{steel} es la conductividad térmica del acero.

Mediante la ecuación 2.7 se puede determinar la temperatura de la superficie interior del aislante (o superficie exterior de la pared interior del horno).

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_1}{k_{\text{steel}} * A_{\text{wall}}}} \quad (\text{Ecuación 2. 7})$$

2.9.4 Espesor del aislante

Una vez que se han determinado las temperaturas de las paredes del horno, mediante las ecuaciones 2.5, 2.6 y 2.7 se procede a determinar el espesor del aislante térmico de tal manera que se logre obtener una temperatura de 50°C en la pared exterior del horno. Esto se logra mediante la ecuación 2.8, manteniendo el flujo de calor obtenido de la ecuación 2.5.

$$q = \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_2}{k_{\text{isolated}} * A_{\text{wall}}}} \quad (\text{Ecuación 2. 8})$$

Donde k_{isolated} se refiere a la conductividad térmica del aislante térmico y e_2 se refiere al espesor del mismo.

El aislante más común en el mercado es la lana de vidrio, por sus amplias aplicaciones y su bajo costo. Este material soporta temperaturas de hasta 550°C y es comúnmente utilizado en calderas, marmitas, tanques térmicos, tuberías de vapor, autoclaves, etc. Las características de este material y el del acero se muestran en la tabla 9, a continuación.

Tabla 9. Propiedades de las paredes del horno

Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg-K)	Conductividad térmica (W/m-K)
Lana de vidrio	32	835	0.034
Acero	7850	460	58

Fuente: Elaboración propia

2.9.5 Calor necesario para calentar la lámina

El calor necesario para llevar a la lámina desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de formado está determinado por la ecuación 2.9.

$$Q_c = \frac{m_L * C_p * (T_b - T_a)}{\text{tiempo}} \quad (\text{Ecuación 2. 9})$$

Esta ecuación cuantifica la cantidad de calor que absorberá la lámina y deberá ser calculada para el caso crítico, el cual corresponderá a la lámina de mayor peso. A esta cantidad de calor, debe sumarse la cantidad de calor perdido para efectos de determinar la potencia del horno.

2.9.6 Pérdidas de calor

Las pérdidas de calor, en el horno, se producen por efectos de conducción a través de las paredes, convección libre al exterior del horno y radiación con los alrededores del horno.

2.9.6.1 Pérdidas por conducción

Las pérdidas por conducción se dan debido a la acumulación de calor por parte de las paredes del horno. Cada pared del horno se encuentra a una temperatura promedio dada por las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12.

$$T_{\text{media1}} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (\text{Ecuación 2. 10})$$

$$T_{\text{media2}} = \frac{T_2 + T_3}{2} \quad (\text{Ecuación 2. 11})$$

$$T_{\text{media3}} = \frac{T_3 + T_4}{2} \quad (\text{Ecuación 2. 12})$$

Donde T_{media1} , T_{media2} y T_{media3} , se refieren a la temperatura promedio de la pared interior del horno, del aislante y la pared exterior del horno respectivamente. Estas paredes están expuestas a un gradiente de temperatura con el aire exterior, dado por las ecuaciones 2.13, 2.14 y 2.15.

$$\Delta T_{w1} = T_{media1} - T_{amb} \quad (\text{Ecuación 2. 13})$$

$$\Delta T_{w2} = T_{media2} - T_{amb} \quad (\text{Ecuación 2. 14})$$

$$\Delta T_{w3} = T_{media3} - T_{amb} \quad (\text{Ecuación 2. 15})$$

Estos gradientes de temperatura producen una pérdida de calor en las paredes, dadas por las ecuaciones 2.16, 2.17 y 2.18.

$$Q_{w1} = \frac{m_{w1} * Cp_{steel} * \Delta T_{w1}}{\text{tiempo}} \quad (\text{Ecuación 2. 16})$$

$$Q_{w2} = \frac{m_{w2} * Cp_{insulated} * \Delta T_{w2}}{\text{tiempo}} \quad (\text{Ecuación 2. 17})$$

$$Q_{w3} = \frac{m_{w3} * Cp_{steel} * \Delta T_{w3}}{\text{tiempo}} \quad (\text{Ecuación 2. 18})$$

Donde Q_{w1} , Q_{w2} y Q_{w3} se refieren a la pérdida de calor a través de la pared interior, aislante y pared exterior del horno respectivamente; m_{w1} , m_{w2} y m_{w3} se refiere a la masa de la pared interior, aislante y pared exterior del horno respectivamente; y, Cp_{Steel} y $Cp_{Insulated}$ se refieren al calor específico de la pared de acero y del aislante respectivamente. El tiempo estará dado por el mayor ciclo de trabajo del horno, el cual será para la lámina que más tiempo tarde en calentarse hasta su temperatura de formado.

2.9.6.2 Pérdidas por convección

En las cercanías de la pared exterior del horno se producirá una diferencia de densidad del aire con respecto a los puntos más alejados de la pared, debido a que la temperatura de la superficie exterior del horno es mayor a la temperatura ambiente. Esto causará movimiento del aire en las cercanías de la pared produciendo el efecto de convección libre.

El coeficiente de convección del aire se lo puede determinar a partir de la ecuación 2.19, a continuación.

$$h_c = \frac{\text{Nusselt} * k_{\text{air}}}{L} \quad (\text{Ecuación 2. 19})$$

Donde k_{air} es la conductividad térmica del aire y L es la longitud característica de la pared exterior, que está dado por la razón del área de la pared con el perímetro de la misma. El número de Nusselt está dado por la siguiente correlación (Incropera, 1999).

$$\text{Nusselt} = 0,68 + \frac{0,67 * (\text{Gr} * \text{Pr})^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{\text{Pr}}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (\text{Ecuación 2. 20})$$

Esta correlación de Nusselt es válida para flujo laminar, en el intervalo de $\text{Gr} * \text{Pr} \leq 10^9$; donde Pr se refiere al número de Prandtl y Gr se refiere al número de Grashof. Este último está dado por la ecuación 2.21.

$$\text{Gr} = T_{\text{film}} * \beta * \frac{L^3 * \rho_{\text{air}}^2 * g}{\nu^2} \quad (\text{Ecuación 2. 21})$$

Donde T_{film} se refiere a la temperatura de película, β es el inverso de la temperatura de película, ρ_{air} es la densidad del aire, g es la gravedad y ν es la viscosidad cinemática. Las propiedades del aire deben ser evaluadas a la temperatura de película, la cual se refiere a la temperatura promedio entre la temperatura de la pared exterior del horno (T_4) y la temperatura ambiente (T_{amb}).

Luego de haber determinado el coeficiente de convección del aire, se puede calcular el calor perdido por la convección libre en el exterior de las paredes, mediante las ecuaciones 2.22 y 2.23 (Incropera, 1999).

$$Q_{\text{conv-lat}} = A_{\text{wall}} * h_c * (T_4 - T_{\text{amb}}) \quad (\text{Ecuación 2. 22})$$

$$Q_{\text{conv-top}} = \text{largo} * \text{largo} * h_c * (T_4 - T_{\text{amb}}) \quad (\text{Ecuación 2. 23})$$

Donde $Q_{\text{conv-lat}}$ y $Q_{\text{conv-top}}$ se refiere al calor perdido por convección en las paredes laterales y en la pared superior del horno.

2.9.6.3 Pérdidas por radiación

Los cuerpos son capaces de emitir y absorber energía radiante dependiendo de las características de cada material. En este caso, las paredes exteriores del horno emiten energía radiante a sus alrededores debido a la diferencia de temperatura que existe entre la pared exterior y la temperatura de los alrededores (Temperatura ambiente). Esta cantidad de energía emitida a los alrededores está dada por la ecuación 2.24 (Frank Kreith, 2011).

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon * \sigma * A_{\text{wall}} * (T_4^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (\text{Ecuación 2. 24})$$

La pérdida de calor total estará dada por la suma de las pérdidas por conducción, convección y radiación.

$$Q_p = Q_{w1} + Q_{w2} + Q_{w3} + Q_{\text{conv-lat}} + Q_{\text{conv-top}} + Q_{\text{rad}} \quad (\text{Ecuación 2. 25})$$

2.9.7 Potencia del horno

La potencia del horno estará dada por el calor que consumirá la carga, en este caso se refiere a la lámina de termoplástico. Además, se deben considerar las pérdidas de calor del sistema para establecer la potencia final del horno, misma que estará dada por la ecuación 2.26.

$$Q_{\text{furnace}} = Q_c + Q_p \quad (\text{Ecuación 2. 26})$$

2.10 Diseño del sistema de Vacío

El sistema de vacío está compuesto de un generador de vacío, con sus complementos que ayudan en la regulación, control y distribución del mismo; el diseño de este sistema se basa en la selección de una bomba de vacío, un tanque acumulador y la instrumentación necesaria.

2.10.1 Selección de Bomba de Vacío.

El volumen máximo del material deformado está ligado al procedimiento de Termoformado, se recomienda una relación de áreas igual a 3, según (MULTIFAB INCORPORATED, 2009), esto se comprueba mediante la ecuación 2.27.

$$AR = \frac{2LH+2WH+LW}{LW} \quad (\text{Ecuación 2. 27})$$

Donde L es el largo de la base del objeto deformado, W es el ancho de la base del objeto deformado y H la altura del objeto deformado.

Al reemplazar las dimensiones del objeto mediante la ecuación 2.28, se puede conocer el volumen del objeto moldeado

$$V_{\text{objeto}} = LHW \quad (\text{Ecuación 2. 28})$$

Para que se pueda realizar un vacío correcto en todas las partes del molde es necesario una mesa de vacío tal como se observa en la figura 14. Esta mesa tiene agujeros que succionan aire y dan forma al producto final, se calcula el volumen de dicha mesa mediante la ecuación 2.29.

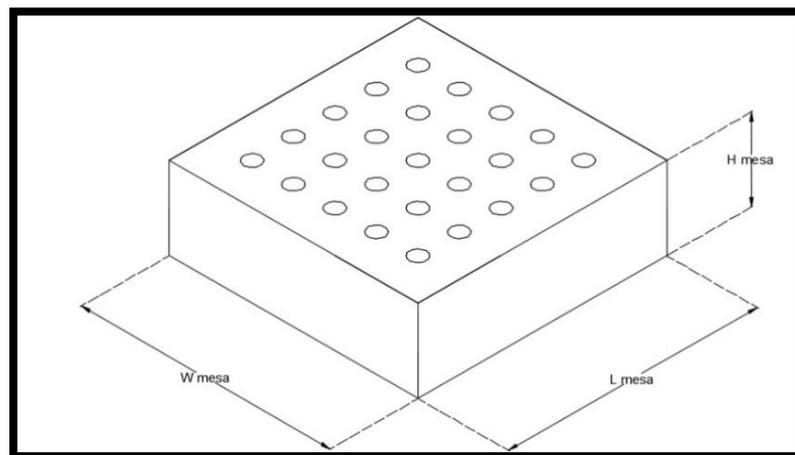


Figura 14. Dimensiones de la mesa de vacío

Fuente: Elaboración propia

$$V_{\text{mesa}} = L_{\text{mesa}}H_{\text{mesa}}W_{\text{mesa}} \quad (\text{Ecuación 2. 29})$$

En el sistema de vacío se utilizan mangueras neumáticas para las conexiones entre bomba, tanque acumulador de vacío e instrumentación necesaria. El volumen de aire de las mangueras se calcula mediante la ecuación 2.30, donde d es el diámetro de la manguera y l se refiere a su longitud.

$$V_{\text{manguera}} = \pi \frac{d^2}{4} * l \quad (\text{Ecuación 2. 30})$$

Se calcula el volumen de aire encerrado en todo el sistema para su posterior evacuación; dicho volumen es la suma de todos los volúmenes previamente calculados, como se observa en la ecuación 2.31

$$V_{\text{total}} = V_{\text{objeto}} + V_{\text{mesa}} + V_{\text{mangueras}} \quad (\text{Ecuación 2. 31})$$

Para la selección de bombas de vacío son necesarios los parámetros de caracterización: Capacidad de Bombeo; estos aspectos están implícitos en la ecuación 2.32 (MARKS, 1986)

$$Sp = \frac{V_{\text{total}}}{t} \text{Ln} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (\text{Ecuación 2. 32})$$

Donde Sp se refiere a la capacidad de bombeo, V_{total} es el volumen total de aire a desplazar, t es el tiempo estimado de aplicación de vacío, P_1 se refiere a la presión atmosférica y P_2 es la Presión de vacío absoluta requerida en el proceso de Termoformado.

2.10.2 Selección de Tanque acumulador de vacío.

El acumulador de vacío tiene la función de realizar la evacuación del aire para el formado de las piezas, el volumen recomendado del tanque pulmón es 2.5 veces el volumen total de aire a desplazar según la ecuación 2.33 (Plastigas de Mexico, S.A. de C.V., 2012).

$$V_{\text{tanque}} = 2.5 V_{\text{total}} \quad (\text{Ecuación 2. 33})$$

2.11 Mecanismo de movimiento de la lámina.

Para realizar el movimiento de la lámina termoplástica, se debe definir el medio de transporte de la lámina y el movimiento de dicho medio. A continuación, se detalla la alternativa seleccionada.

2.11.1 Marco de sujeción

Esta parte de la maquina debe transportar a la lámina previamente calentada, dicho marco tiene una parte superior e inferior que está recubierta con lana mineral en las superficies que están en contacto con la lámina. Se incluyen bisagras y una cuña que cierra firmemente dicho elemento.

Las dimensiones de dicho marco están regidas por el tamaño de la mesa de vacío, tanto en el ancho y largo es decir el área libre de la lámina debe coincidir con el área de la mesa de vacío, como se puede observar en la figura 15.

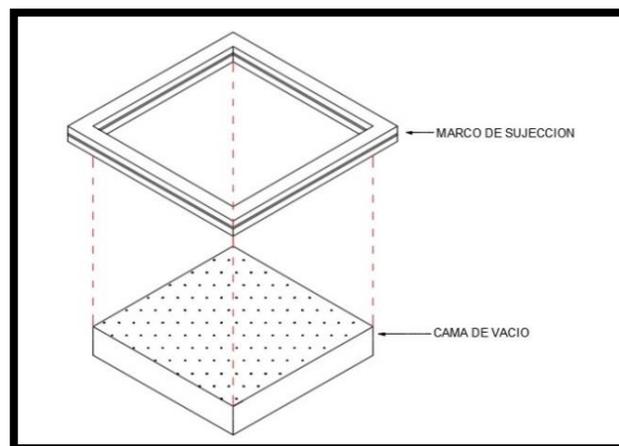


Figura 15. Esquema de la geometría marco – mesa de vacío

Fuente: Elaboración propia

2.11.2 Mecanismo de movimiento

El marco de sujeción debe ser móvil, por lo cual se acopla a un sistema de movimiento que se acciona con una palanca. Dicho sistema se ubica a los costados del marco de sujeción y debe transformar un movimiento circular en un movimiento lineal, esta secuencia se observa en la figura 16.

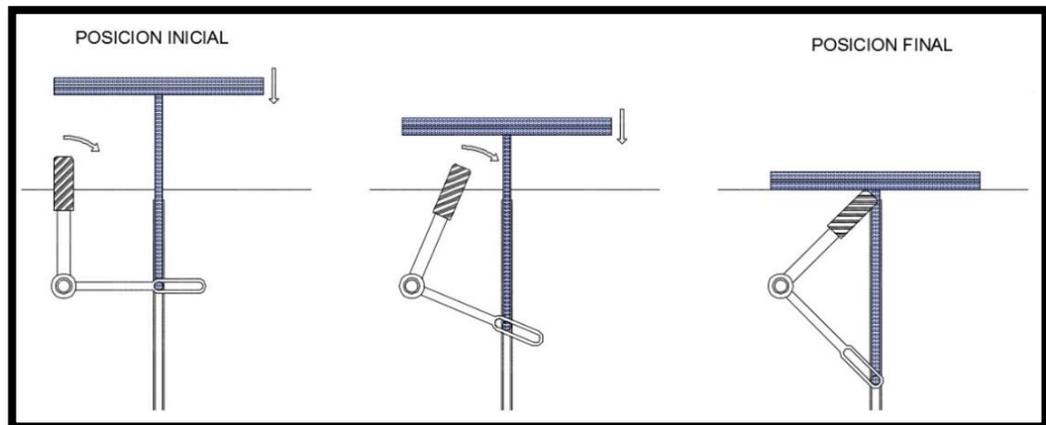


Figura 16. Secuencia del movimiento del mecanismo de movimiento

Fuente: Elaboración propia

La palanca móvil está habilitada para girar un ángulo de 45° en el sentido de las agujas del reloj, la distancia Y_p es la que debe bajar la plataforma, se observa la disposición de los elementos al final del movimiento en la figura 17.

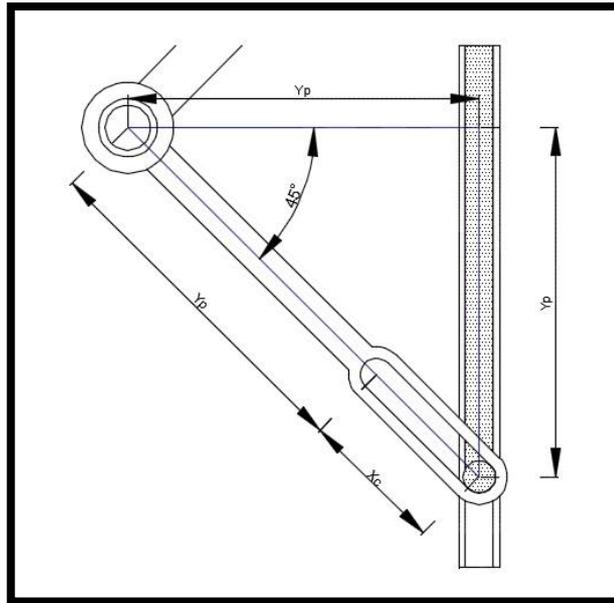


Figura 17. Geometría de la corredera del mecanismo

Fuente: Elaboración propia

Como se observa la geometría del mecanismo se asemeja a un triángulo rectángulo, donde Y_p es la longitud que debe bajar el marco de sujeción y a su vez es la distancia entre el inicio de la barra articulada y el inicio de la corredera.

Mediante el uso del Teorema de Pitágoras según la ecuación 2.34. se obtiene la longitud necesaria de la corredera X_c para que se lleve a cabo el movimiento.

$$X_c = \sqrt{2}Y_p - Y_p \quad (\text{Ecuación 2. 34})$$

Este mecanismo debe regresar a su posición inicial, para dicha tarea se seleccionan 2 resortes mediante el método de sumatoria de fuerzas y con una deformación máxima ΔY debido el peso de la estructura W_m como se observa en la ecuación 2.35.

$$K_r = \frac{W_m}{2 \Delta Y} \quad (\text{Ecuación 2. 35})$$

2.11.3 Longitud de la palanca

El diagrama de cuerpo libre del mecanismo de la figura 18, muestra a la plataforma en su posición final, se observan las fuerzas que actúan en el mecanismo. Se realiza una sumatoria de momentos alrededor del punto O tal como la ecuación 2.36.

Dónde: F_b es la fuerza ejercida por el brazo humano, L_b la longitud de la palanca, F_r es la fuerza del resorte debido a la deformación Y_p , que es la distancia que debe bajar la plataforma.

$$-F_b L_b + 2F_r Y_p = 0 \quad (\text{Ecuación 2. 36})$$

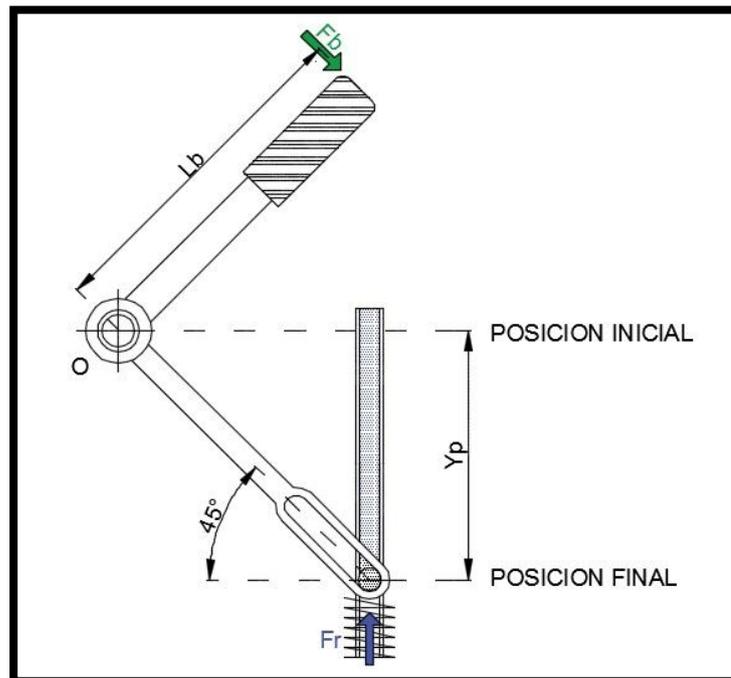


Figura 18. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo de movimiento

Fuente: Elaboración propia

Se puede despejar la longitud de la palanca L_b , según la ecuación 2.37.

$$L_b = \frac{2K_r(Y_p^2)}{F_b} \quad (\text{Ecuación 2. 37})$$

2.12 Estructura de la máquina.

Para el diseño de la estructura de la máquina de Termoformado se toman en cuenta los siguientes criterios.

- La estructura que soporta el peso y fuerzas del equipo debe ser preferiblemente pequeña, maximizando el uso del espacio sin descuidar la apariencia exterior de la máquina de Termoformado.
- El material de la estructura debe ser de fácil acceso en el país, estimando el esfuerzo que va a soportar y facilitando su procedimiento de montaje.
- Los cálculos de esfuerzos máximos y factores de seguridad de la estructura, se realizan mediante un análisis de elementos finitos; el cual se basa en modelos matemáticos de situaciones críticas a las que va a estar sometida la máquina.

Tanto el horno, bomba de vacío y tanque acumulador son equipos con peso y dimensiones considerables, debido a esto la estructura de la maquina debe distribuir los equipos tomando en cuenta; el tamaño y peso respectivo de los equipos.

Se opta por una estructura que contenga el sistema de vacío y mecanismo de movimiento del marco de sujeción, que en conjunto tiene un peso aproximado de 18 kg, dicha estructura tiene dimensiones 500 x 850 x 370 mm aproximadamente, dividido en 7 pórticos que soportan el peso sobre la estructura.

Sobre dichos pórticos se apoya la estructura que sostiene el mecanismo de movimiento del horno, estas son 4 columnas con longitud 280 mm para un horno de 6 kg. Se puede observar en la figura 19 el esquema de la estructura mencionada.

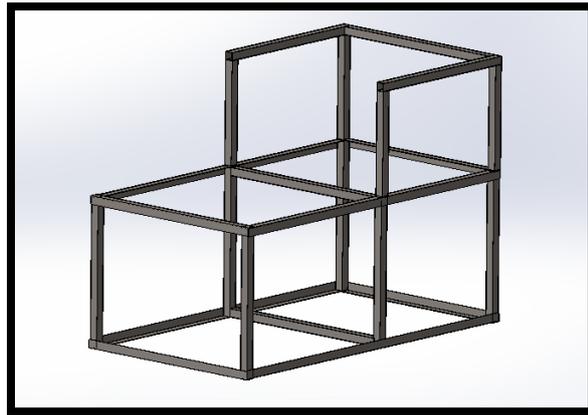


Figura 19. Estructura de la maquina

Fuente: Elaboración propia

Para las columnas de la estructura se utiliza perfil estructural cuadrada, para los marcos superior e inferior de la estructura se utiliza Perfil estructural angular, ambos de acero ASTM A36; en la figura 20 y tabla 10 se puede observar sus propiedades geométricas y físicas respectivamente.

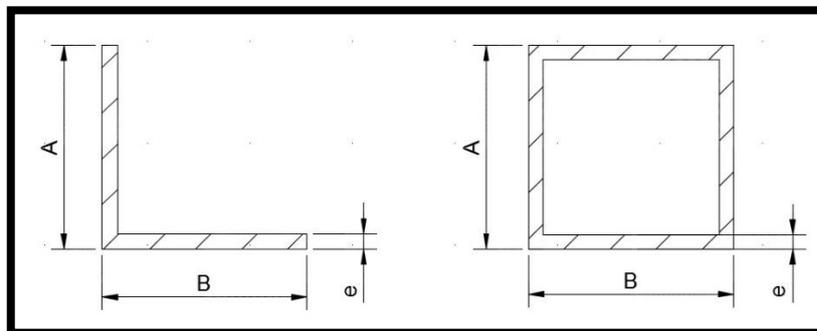


Figura 20. Dimensiones de perfil angular y cuadrado

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Dimensiones y propiedades de perfiles estructurales

Perfil Estructural	Angulo	Cuadrado
Material	ASTM A36	ASTM A366
A (mm)	20	20
B (mm)	20	20
e (mm)	1.50	1.10
Módulo de Elasticidad, E (kgf/mm^2)	20394.32	20394.32
Resistencia a la fluencia, Sy (kgf/mm^2)	21.44	21.44
Coefficiente de Poisson, μ	0.3	0.3
Peso, W (kgf/m)	0.44	0.64
Inercia, I (mm^4)	2100	5400

Fuente: Elaboración propia

Se considera un análisis estático de las cargas actuantes, debido a que estas no varían en el tiempo, con el fin de analizar el comportamiento de la estructura ante fuerzas externas. El modelo matemático de la estructura se muestra en la figura 21.

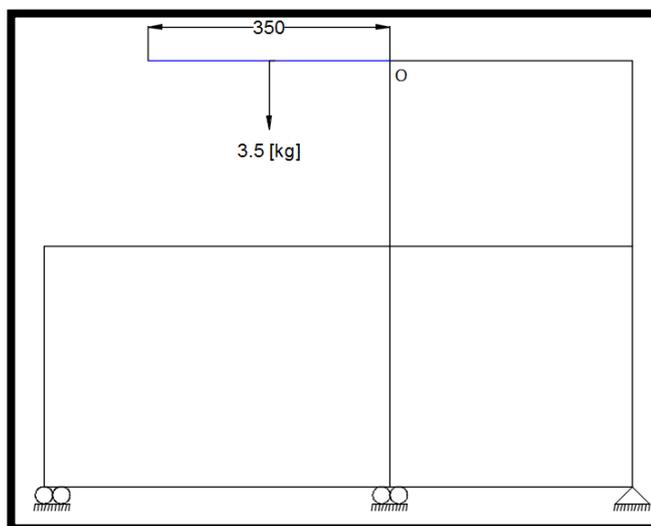


Figura 21. Modelo matemático de la estructura

Fuente: elaboración propia

Debido a la simetría de la estructura, se muestra la vista lateral de la misma en el modelo matemático. El caso crítico corresponde a la corredera extendida ya que en esta posición el peso del horno creará una

fuerza de reacción vertical y un mayor momento flector en el punto O. La línea en azul representa la corredera que permitirá el movimiento del horno.

El análisis de esfuerzos será realizado mediante simulación computacional, con el software ANSYS a través de la interfaz APDL. De esta manera se podrá obtener el máximo esfuerzo que soporta la estructura y corroborar que los perfiles fueron correctamente seleccionados.

El factor de seguridad, para comprobar que la estructura no falla, se lo obtiene de la ecuación 2.38 (Norton, 2011).

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad (\text{Ecuación 2. 38})$$

Donde η se refiere al factor de seguridad, el cual debe ser mayor a la unidad para corroborar que la estructura no fallará. S_y denota el esfuerzo de fluencia del material y σ_{max} es el esfuerzo máximo que soporta la estructura.

2.13 Sistema de adquisición de datos

La máquina de termoformado consta de un sistema de adquisición de datos que permite censar la temperatura de la lámina de plástico durante el proceso de calentamiento. En la figura 22 se observa un esquema del sistema de adquisición de datos.

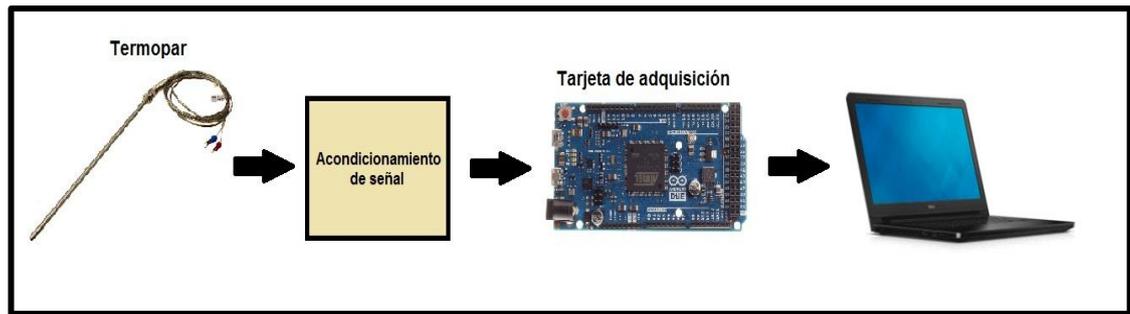


Figura 22. Esquema del sistema de adquisición de datos

Fuente: elaboración propia

El termopar tipo K será el instrumento de medición encargado de censar la temperatura de la lámina, ya que este es el más común en el mercado.

Dado que el termopar provee una señal de voltaje del orden de los milivoltios, es necesario amplificar la señal al nivel en el cual el convertidor analógico-digital puede leer de manera eficiente la señal.

Para ello es necesario emplear un amplificador de instrumentación, el cual es un tipo de circuito que permite amplificar una diferencia de tensión en sus terminales de entrada. El mismo opera con una fuente de alimentación dual de +12 y -12 voltios.

La sensibilidad del termopar está dada por la razón entre la diferencia del voltaje y la diferencia de temperatura del instrumento.

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (\text{Ecuación 2. 39})$$

La ecuación de salida del termopar tiene un comportamiento lineal y está dado por la ecuación 2.40.

$$y = mx + b \quad (\text{Ecuación 2. 40})$$

Donde "m", la pendiente de la curva, representa la sensibilidad del termopar; "y" representa el voltaje de salida del termopar en mili-voltios,

“b” representa la intersección con el eje de la ordenada y “x” representa la variable de temperatura, en grados centígrados, medida por el termopar.

En la ecuación 2.39 se evalúa el rango de voltaje correspondiente al rango de temperatura de trabajo. Esta diferencia de voltaje se debe amplificar al rango que la tarjeta Arduino permite recibir en sus pines (3.3V). De este modo, se obtiene la ganancia del amplificador mediante la ecuación 2.41.

$$\Delta V_{op} * G = 3000 [mV] \quad (\text{Ecuación 2. 41})$$

Donde ΔV_{op} se refiere al rango de voltaje de operación, G representa la ganancia y el lado derecho de la ecuación está dado por el voltaje que permite recibir la tarjeta Arduino.

Una vez que la señal analógica emitida por el termopar ha sido amplificada, la tarjeta Arduino la recibe y la convierte en una señal digital que es mostrada, mediante el software Matlab, a través de una interfaz gráfica.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados de diseño correspondiente a los equipos que forman la máquina de termoformado.

Los cálculos detallados, correspondientes al sistema de calentamiento, sistema de vacío y mecanismo de movimiento se presentan en los apéndices A, B, C y D respectivamente.

La estructura fue analizada mediante una simulación en el software ANSYS para conocer los esfuerzos que actúan sobre la misma. El resto de cálculos se detallan en los apéndices de este documento.

3.1 Resultado de sistema de calentamiento

3.1.1 Tiempo de calentamiento de las láminas

Después de un proceso iterativo, se obtuvieron los tiempos necesarios para elevar la temperatura de las láminas desde su temperatura inicial hasta su temperatura de formado; teniendo en cuenta que la temperatura inicial de las láminas corresponde a la temperatura ambiente, la cual fue considerada de 16°C debido a que el equipo estará ubicado en un laboratorio ambientado a estas condiciones por las unidades de refrigeración.

Con la ecuación 2.4, se obtuvieron los tiempos de calentamiento de las láminas termoplásticas mostradas en la tabla 11.

Tabla 11. Tiempo de calentamiento

Plástico	Espesor (mm)	Tiempo de calentamiento (s)
PS	3	54
	2	36
	1,5	28
	1	18
PE	3	82
	2	55
	1,5	41
	1	28

Fuente: Elaboración propia

Para las iteraciones, se asumió un valor de Δt de 1 segundo. El proceso consistió en calcular la temperatura de la lámina en este lapso de tiempo, es decir T_{i+1} . Para la siguiente iteración, el valor de la temperatura inicial (T_i) fue el obtenido de la anterior iteración. De este modo, el proceso se repite hasta llegar a la temperatura de formado de la lámina analizada y se obtienen los tiempos de calentamiento.

3.1.2 Temperatura en las paredes del horno

La distribución de temperaturas a través de las paredes del horno está dada de acuerdo a la figura 13. Los valores de estas temperaturas se muestran en la tabla 12 a continuación.

Tabla 12. Temperatura en las paredes del horno

Denominación	Temperatura (K)	Temperatura (°C)
T_1	723.00	450.00
T_2	722.99	449.99
T_3	323.01	50.01
T_4	323.00	50.00

Fuente: Elaboración propia

La temperatura en la superficie interior del horno, T_1 fue asumida igual a la de las resistencias de calentamiento. La temperatura en la superficie

exterior del horno, T_4 , fue establecida de tal manera que se evite quemaduras del usuario en caso de un potencial contacto con el horno encendido.

Mediante la ecuación 2.5 se obtuvo el flujo de calor entre la pared exterior y el ambiente, para lo cual se tuvo que calcular el coeficiente convectivo del aire en las cercanías de la superficie exterior del horno. El coeficiente convectivo se obtuvo a través de la ecuación 2.19.

$$h_c = 14.05 \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (\text{Ecuación 3. 1})$$

$$q = 16.72 [W] \quad (\text{Ecuación 3. 2})$$

La temperatura T_3 y T_2 se las obtuvo despejándolas de la ecuación 2.6 y ecuación 2.7 respectivamente.

3.1.3 Espesor del aislante

En el diseño del horno se ha considerado colocar un aislante térmico entre las paredes interiores y exteriores, de modo que la temperatura de la superficie exterior se mantenga a 50°C . El espesor del aislante, necesario para mantener la temperatura deseada en la superficie exterior, se lo obtiene despejando de la ecuación 2.8.

$$e_2 = 0.028 [m] \approx 3 [cm] \quad (\text{Ecuación 3. 3})$$

3.1.4 Energía requerida para calentar la lámina

La energía necesaria para llevar una lámina de termoplástico desde su temperatura inicial hasta su temperatura de formado fue calculada mediante la ecuación 2.9.

$$Q_c = 1235 [W] \quad (\text{Ecuación 3. 4})$$

Se realizó el cálculo para la lámina de mayor espesor ya que esta será la que requerirá de mayor energía para elevar su temperatura.

3.1.5 Pérdidas de calor

Las pérdidas de calor están dadas por efectos de conducción, convección y radiación.

El calor acumulado en las paredes del horno está sujeto a un gradiente de temperatura entre la temperatura media de las paredes y la temperatura ambiente. Esto produce una pérdida de calor en cada pared, dadas por las ecuaciones 2.16, 2.17 y 2.18.

$$Q_{w1} = 668.9 \text{ [W]} \quad (\text{Ecuación 3. 5})$$

$$Q_{w1} = 75.95 \text{ [W]} \quad (\text{Ecuación 3. 6})$$

$$Q_{w1} = 52.41 \text{ [W]} \quad (\text{Ecuación 3. 7})$$

Las pérdidas por convección en la superficie lateral y superior del horno se las obtuvo de las ecuaciones 2.22 y 2.23.

$$Q_{\text{conv-lat}} = 16.72 \text{ [W]} \quad (\text{Ecuación 3. 8})$$

$$Q_{\text{conv-top}} = 58.54 \text{ [W]} \quad (\text{Ecuación 3. 9})$$

Mientras que la pérdida por radiación con el ambiente se la obtuvo de la ecuación 2.24.

$$Q_{\text{rad}} = 6.981 \text{ [W]} \quad (\text{Ecuación 3. 10})$$

La pérdida total de calor del sistema, dada por la ecuación 2.25, representa la suma de todas las pérdidas producidas por los efectos de conducción, convección y radiación.

$$Q_p = 879.5 \text{ [W]} \quad (\text{Ecuación 3. 11})$$

3.1.6 Potencia del horno calculada

La potencia que requerirá el horno para poder calentar la lámina termoplástica y compensar las pérdidas de calor, se lo obtiene de la ecuación 2.26.

$$Q_{\text{furnace}} = 2114 \text{ [W]} \quad (\text{Ecuación 3. 12})$$

El calentador debe ser capaz de cubrir la potencia demandada por el horno y para ello se ha escogido resistencias eléctricas tipo tubulares de 3/8" de diámetro.

Según el fabricante *TELECINEC S.A.*, estas resistencias generan 2200 W de potencia en una longitud de 224 cm. La distribución de la resistencia eléctrica se muestra en la figura 23.

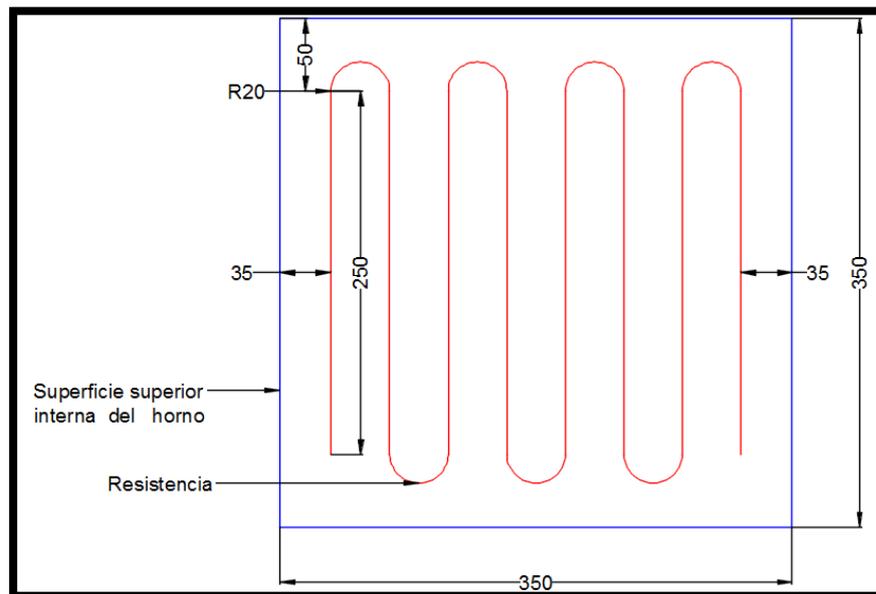


Figura 23. Distribución de la resistencia en el horno

Fuente: Elaboración propia

3.2 Resultados del sistema de vacío

A continuación, se detallan el procedimiento para la selección de los elementos del sistema de vacío.

3.2.1 Selección de 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:

La dimensión del objeto producto de la deformación de la lámina en el molde están regidas por la relación de áreas AR igual a 3 (MULTIFAB INCORPORATED, 2009), las dimensiones de la lámina termoplástica a deformar: L igual a 280 mm y W igual a 280 mm, H se fija en 70 mm y se comprueba que cumple con lo estipulado mediante la ecuación 2.27.

$$AR = 2 \quad \text{(Ecuación 3. 13)}$$

El volumen máximo del objeto se calcula mediante la ecuación 2.28.

$$V_{\text{objeto}} = 54.88 \times 10^5 \text{ [mm}^3\text{]} \quad \text{(Ecuación 3. 14)}$$

La mesa de vacío permite la distribución uniforme en toda el área a deformar, las dimensiones de dicha mesa deben coincidir con las dimensiones de la lámina termoplástica dichas dimensiones son: L_{mesa} igual a 280 mm, W_{mesa} igual a 280 mm y la altura H_{mesa} se fija en 25 mm; el volumen de la mesa de vacío se obtiene mediante la ecuación 2.29.

$$V_{\text{mesa}} = 19.60 \times 10^5 \text{ [mm}^3\text{]} \quad \text{(Ecuación 3. 15)}$$

El sistema de vacío se conecta mediante mangueras de caucho con un diámetro d igual a 1/4 pulgadas, se estima una longitud l aproximada de 2 metros, se obtiene el volumen de las mangueras mediante la ecuación 2.30.

$$V_{\text{manguera}} = 63.22 \times 10^3 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (\text{Ecuación 3. 16})$$

El volumen total del sistema de vacío se obtiene mediante la ecuación 2.31.

$$V_{\text{total}} = 75.11 \times 10^5 \text{ [mm}^3\text{]} \approx 0.265 \text{ [ft}^3\text{]} \quad (\text{Ecuación 3. 17})$$

La caracterización de la bomba de vacío se realiza mediante el cálculo de la capacidad de bombeo S_p en la ecuación 2.32, donde se fija: un tiempo t de 8 segundos, presión atmosférica P_1 de 22.91 pulgadas de Mercurio y presión de trabajo P_2 de 27 pulgadas de Mercurio.

$$S_p = 0.204 \text{ CFM} \quad (\text{Ecuación 3. 18})$$

Como se observa la capacidad de bombeo es mínima, debido a que son piezas pequeñas. Se opta por una Bomba Robinair Modelo 15115 de una etapa, con una capacidad de bombeo de 1.5 CFM y última presión de trabajo de 29 in Hg, se adjunta las especificaciones técnicas en el apéndice E.

3.2.2 Selección de Tanque acumulador de vacío.

Las bombas de vacío no tienen capacidad para realizar varias operaciones en intervalos cortos de tiempo, por esta razón se adiciona un tanque acumulador de vacío cuyo volumen se calcula mediante la ecuación 2.33.

$$V_{\text{tanque}} = 187.77 \times 10^5 \text{ [mm}^3\text{]} \approx 18.77 \text{ [lt]} \quad (\text{Ecuación 3. 19})$$

Se selecciona un tanque acumulador de vacío con capacidad de 20 litros, dicho tanque es un recipiente a presión como se observa en la figura 24.

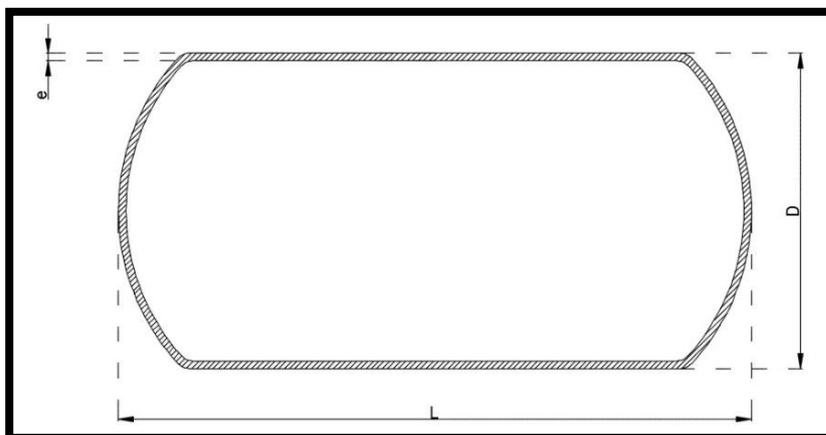


Figura 24. Tanque de vacío.

Fuente: Elaboración propia

Se detallan las especificaciones de dicho tanque en la tabla 13.

Tabla 13. Dimensiones de perfil rectangular

Material	ASTM A366
L (mm)	490
D (mm)	304
e (mm)	3

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Descripción del Sistema de Vacío.

El sistema de vacío consta de un generador de vacío, acumulador de vacío e instrumentación adicional; todos estos elementos tienen la función de generar, regular, controlar y distribuir el vacío para lograr evacuar el aire del sistema, a continuación, se hace un recuento de los artículos seleccionados:

- Bomba de vacío Robinair de una sola etapa. Encargada de generar vacío para el sistema, Capacidad de bombeo: 1.5 CFM, Presión última de succión: 29 pulgadas de Mercurio.
- Tanque acumulador de vacío. Reserva vacío para realizar más de una operación en cortos intervalos de tiempos, Capacidad volumétrica: 20 litros, Presión de vacío 27 pulgadas de Mercurio.
- Mesa de Vacío. Es una plataforma con agujeros que distribuye el vacío en la base donde se asienta el molde, dimensiones: 28cm x 28cm x 2.5cm.
- Válvula 2/2 N.C. Válvula de paso 2 vías 2 Posiciones Normalmente Cerrada. Esta válvula está conectada al acumulador de vacío, se abre por un intervalo de 8 segundos para que el vacío actúe sobre la mesa.
- Vacuometro. Mide la presión de vacío en el tanque acumulador.
- Filtros. Utilizados generalmente en sistemas de aire comprimido, sirven para proteger de impurezas al tanque acumulador y bomba de vacío.

Se observa un diagrama del sistema de vacío en la figura 25.

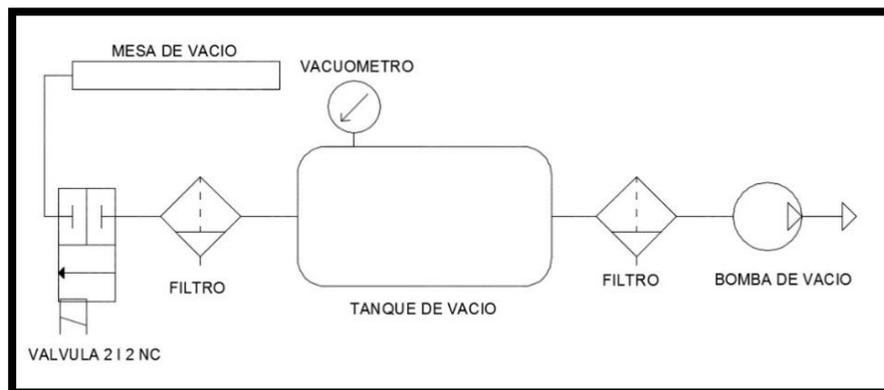


Figura 25. Diagrama del sistema de vacío.

Fuente: Elaboración propia

3.3 Resultados del mecanismo de movimiento del marco de la lámina

Se detallan los resultados relacionados con el sistema marco de sujeción – mecanismo de movimiento.

3.3.1 Resultados marco de sujeción.

El marco de la lámina tiene una dimensión final de: 330 x 330 x 30 mm, dejando un espacio interior libre para la lámina de 280 x 280 mm. Recordar que dicha lamina es de mayor tamaño, pero el marco toma 10 mm de cada borde para mayor sujeción, como se observa en la figura 26.

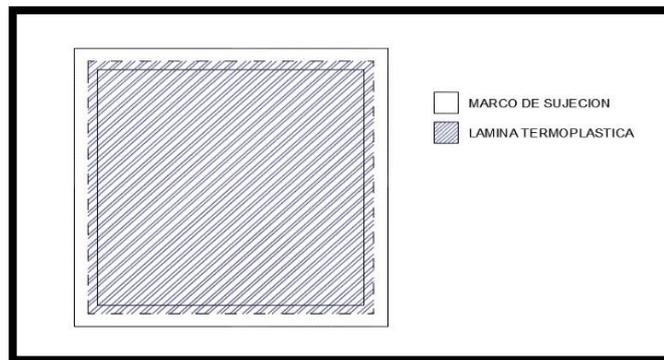


Figura 26. Marco de sujeción y lamina termoplástica.

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Resultados de mecanismo de movimiento.

Para bajar el marco de sujeción hacia la mesa de vacío, se necesita de un mecanismo de movimiento que se accione con el movimiento de una palanca. Dicho mecanismo es de 1 grado de libertad, consta de: un eje unido a la palanca, dos barras perpendiculares ha dicho eje y correderas que contienen el marco de sujeción, como se puede observar en la figura 27.

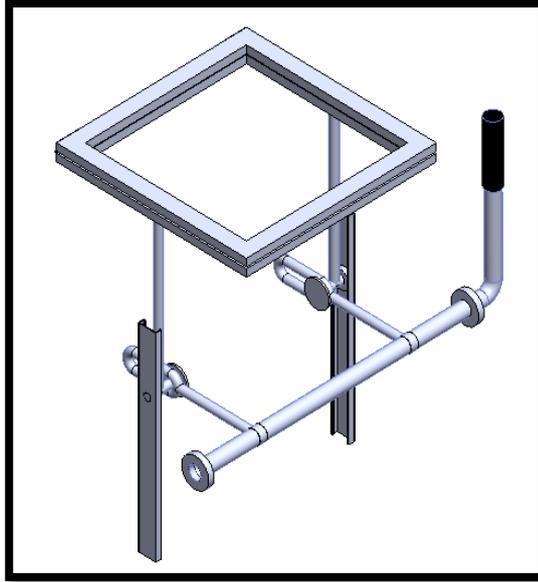


Figura 27. Mecanismo de movimiento.

Fuente: Elaboración propia

Al girar la palanca 45° en sentido horario las barras perpendiculares al eje se desplazarán angularmente, empujando a las columnas del marco hacia abajo como se observa en la secuencia de la figura 20. La longitud X_c de la corredera ubicada al final de las barras perpendiculares, asegura que la distancia Y_p que baje el marco de sujeción sea de 150 mm, dicha longitud según la ecuación 2.34 es.

$$X_c = 62.13 \text{ [mm]} \quad \text{(Ecuación 3. 20)}$$

El mecanismo debe regresar a su posición inicial, por lo que se adicionan dos resortes que soportan el peso del marco W_m de 10.38 N con una deformación máxima ΔY de 50 mm. Dichos resortes según la ecuación 2.35, tienen una constante K_r :

$$K_r = 0.103 \text{ [N/mm]} \quad \text{(Ecuación 3. 21)}$$

Los resortes para aplicaciones domesticas como este caso, son elaborados con una aleación Cobalto – Níquel, dicho resorte tiene una

constante K_r de 0.109 N/ mm. Se observa en la tabla 14 las especificaciones que se requieren.

Tabla 14. Especificaciones del Resorte

Material del resorte	Aleación Cobalto – Níquel
Diámetro del alambre (mm)	0.7
Longitud sin deformar (mm)	30
Diámetro interior del resorte (mm)	38.12
Numero de espiras	25

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Resultados de longitud de palanca.

Estos dos resortes van a ejercer una fuerza F_r que origina un momento alrededor del punto O, a su vez la fuerza del brazo humano F_b produce un momento en el mismo punto. El mecanismo para mantenerse en la posición final se debe encontrar en equilibrio, razón por la que ambos momentos son equivalentes como se observa en la figura 28 y ecuación 2.36.

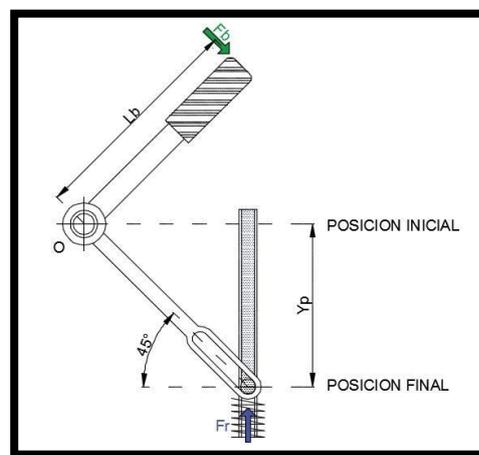


Figura 28. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo de movimiento

Fuente: Elaboración propia

La fuerza máxima que puede realizar un humano de contextura física normal es de 686 N, por lo que se resuelve fijar una fuerza F_b de 68.6 N para el diseño de la máquina. Dicho esto, la longitud de la palanca L_b se calcula la ecuación 2.37.

$$L_b = 67.56 [mm] \quad (\text{Ecuación 3. 22})$$

Se fija la longitud de la palanca L_b en 200 mm para mayor comodidad del usuario.

3.4 Validación de la estructura

La estructura que soportará las cargas que ejercen los equipos de la máquina fue analizada mediante una simulación para determinar si la misma falla.

El modelo matemático, expuesto en la figura 21, representa el caso en el que el peso del horno se encuentra actuando sobre la corredera extendida. Esta fuerza se transmite a la estructura en el punto O, ejerciendo sobre el mismo una carga puntual y un momento.

En la figura 29 se puede observar el modelo de la estructura con las cargas que actúan sobre la misma previo a la simulación.

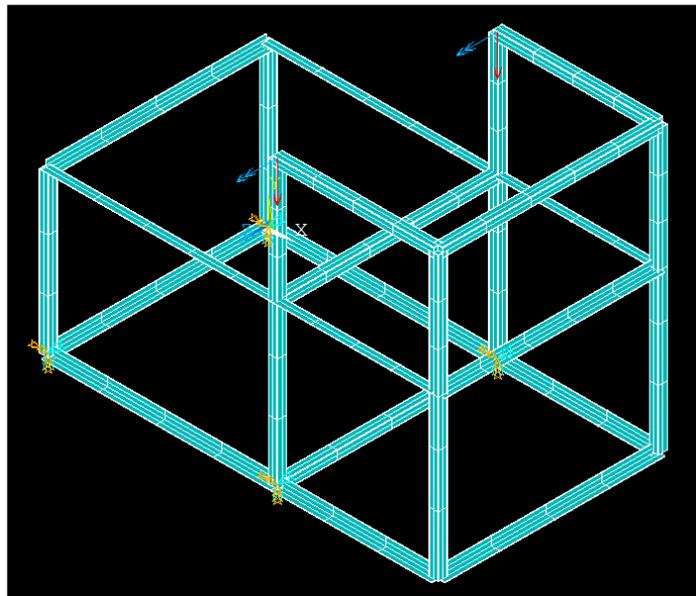


Figura 29. Modelo de la estructura con las cargas aplicadas

Fuente: Elaboración propia

Las flechas en rojo representan la carga puntual ejercida por el peso del horno en el punto O y las flechas en azul representan los momentos sobre el mismo punto. Las líneas de color naranja, corresponden a las restricciones planteadas en el modelo matemático de la figura 21.

El peso del horno corresponde a aproximadamente 70 N, por lo que en la simulación se colocaron las cargas en cada punto con un valor de 35 N. El momento ejercido por el horno, sobre el punto O, es de aproximadamente 7 Nm.

Con estos valores se realizó la simulación y se obtuvo resultados de los esfuerzos y deformaciones que soporta la estructura, los cuales se muestran en la figura 30 y 31 respectivamente.

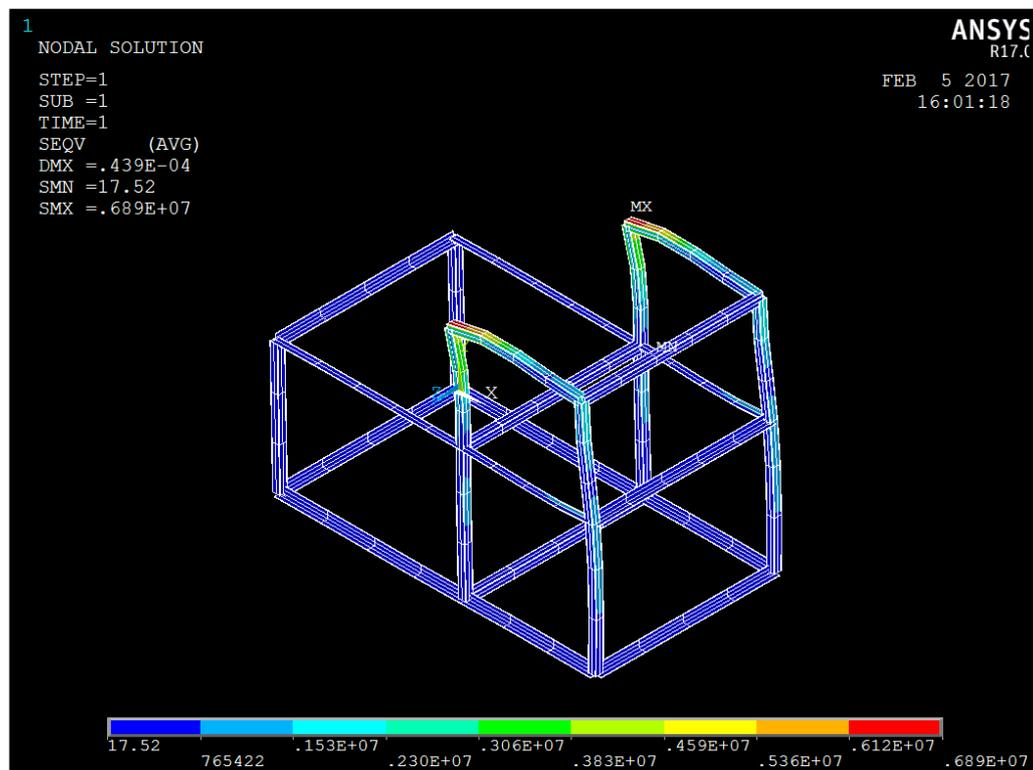


Figura 30. Resultado de los esfuerzos que soporta la estructura en Pa

Fuente: Elaboración propia

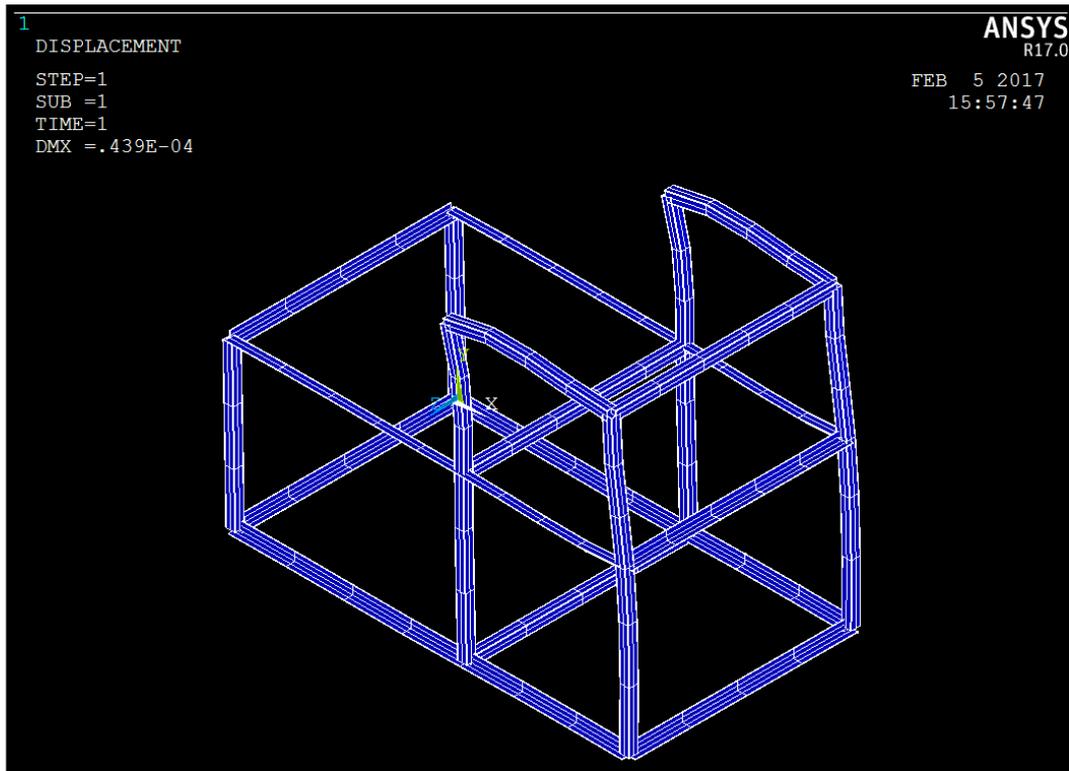


Figura 31. Resultado de las deformaciones que sufre la estructura en metros

Fuente: Elaboración propia

El material con el que se realizó la simulación de la estructura fue acero A36, por lo tanto, el módulo de Young (E) es de 210 GPa y el coeficiente de Poisson (ν) es 0.3.

En la figura 30 se puede observar que el máximo esfuerzo que soporta la estructura se da en el punto O y es de aproximadamente 7 MPa. Además, la máxima deformación es de 0.04 mm.

El factor de seguridad de la estructura, considerando que la resistencia a la fluencia del acero A36 es de 248 MPa, se lo obtiene de la ecuación 2.48.

$$\eta = 35 \quad (\text{Ecuación 3. 23})$$

Para validar los resultados arrojados por la simulación, se debe verificar que las reacciones calculadas por el software deben ser iguales a las cargas aplicadas. Estos valores se pueden observar y validar en la figura 32.

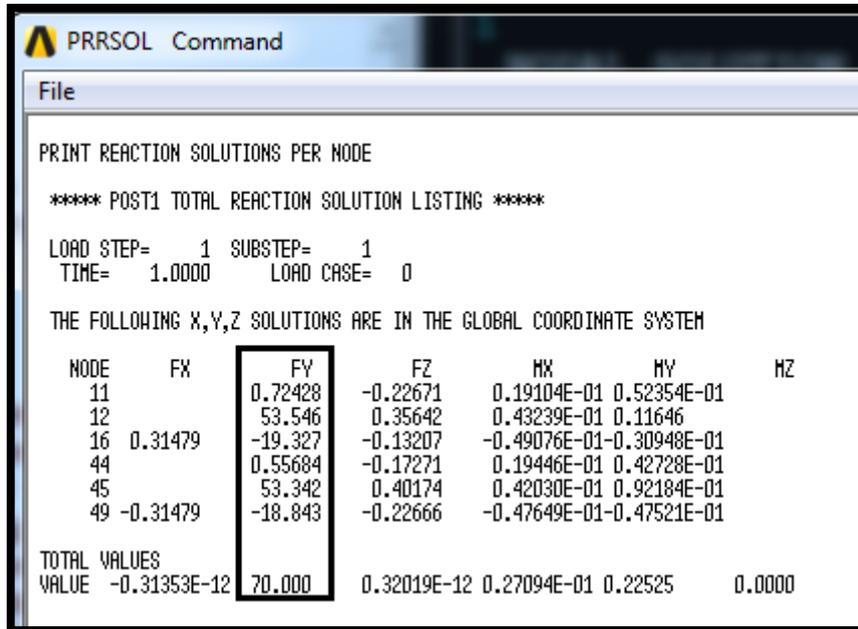


Figura 32. Reacciones obtenidas por la simulación

Fuente: Elaboración propia

3.5 Adquisición de datos

Como se mencionó en el capítulo 2, la señal de salida del termopar debe ser amplificada para que la tarjeta Arduino pueda receptarla; razón por la cual se ha elegido un amplificador AD620N.

Para alimentar el amplificador, se realiza un circuito de tal manera que la fuente de alimentación del mismo sea de +12 y -12 voltios para lo cual se utiliza: un transformador de 120/12 volts, un puente rectificador, dos capacitores y dos reguladores 7812 y 7912 que alimentan el amplificador. El circuito resultante se muestra en la figura 33.

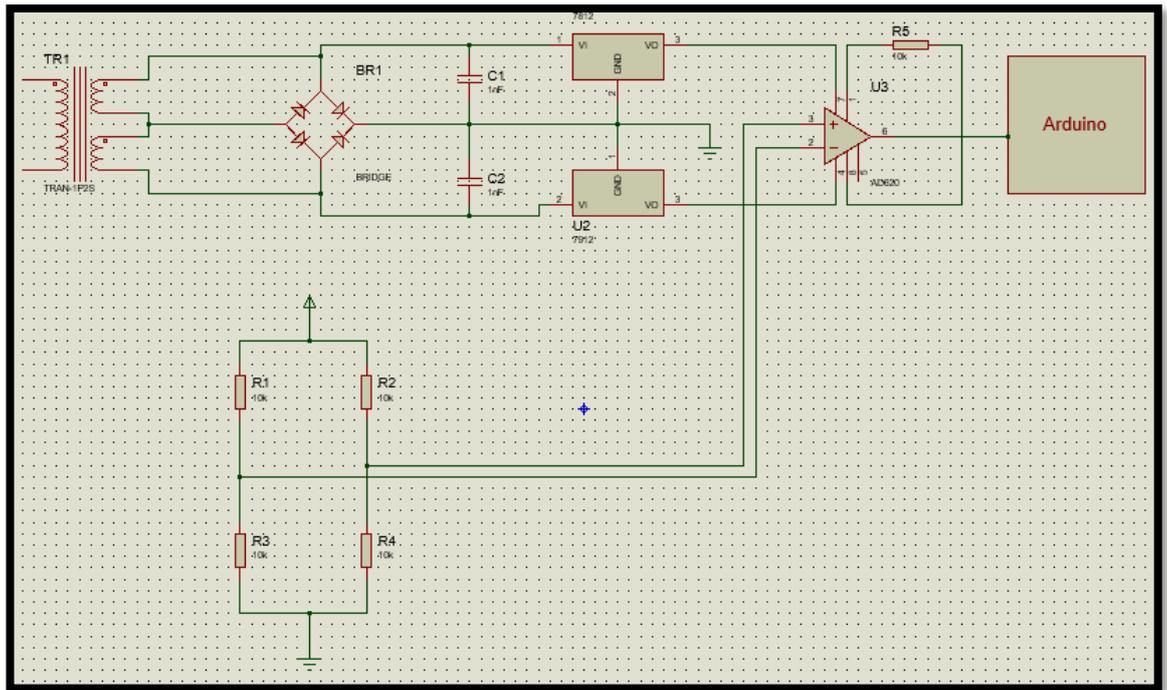


Figura 33. Circuito para el sistema de adquisición de datos

Fuente: Elaboración propia

El transformador permite disminuir el voltaje de la red eléctrica local hasta el voltaje apropiado para la elaborar una fuente DC que alimente el amplificador, el puente rectificador se usa para el proceso de rectificación de corriente AC en DC, mientras que los condensadores eléctricos y los reguladores de voltaje son colocados para el proceso de rectificación con el objetivo de estabilizar la señal.

Considerando que el rango de voltaje del termopar tipo K es de -5.891 a 54.875 mili-voltios y el rango de temperatura es de -200 a 1372 °C, la sensibilidad del termopar, dada por la ecuación 2.39, es de:

$$m = 0.03864 \left[\frac{mV}{^{\circ}C} \right] \quad (\text{Ecuación 3. 24})$$

La ecuación de salida del termopar, dada en la ecuación 2.40, es:

$$y = 0.03864x + 1.84004 \quad (\text{Ecuación 3. 25})$$

A una temperatura de 0°C, el voltaje de salida será:

$$y = 1.84004 \text{ [mv]} \quad (\text{Ecuación 3. 26})$$

Mientras que, a una temperatura de 170°C, el voltaje de salida será:

$$y = 8.40884 \text{ [mv]} \quad (\text{Ecuación 3. 27})$$

La diferencia de voltaje de operación corresponde a:

$$\Delta V_{op} = 6.5688 \text{ [mv]} \quad (\text{Ecuación 3. 28})$$

La ganancia del amplificador es:

$$G = 456.7 \quad (\text{Ecuación 3. 29})$$

La adquisición de datos realizada por la tarjeta Arduino se muestra mediante una interfaz gráfica del software Matlab. En esta interfaz se selecciona el material termoplástico con el que se va a trabajar y espesor de la lámina respectivo.

Con dichos datos el software muestra la temperatura de deformado y el tiempo de calentamiento recomendado para el respectivo material. Dicha interfaz también muestra los valores de temperatura y tiempo medidos durante el proceso calentamiento, estos son graficados en una curva de temperatura vs tiempo en la parte derecha de la interfaz.

Mediante un mensaje mostrado por la interfaz gráfica se obtiene información acerca del estado de la lámina. Dichos mensajes se basan en la temperatura medida a tiempo real, teniendo 3 posibles opciones: temperatura insuficiente, apta para deformar, peligro de degradación.

En la interfaz se encuentran los siguientes botones: “Activar interfaz” este botón enlaza al ordenador con la tarjeta Arduino, lo que permite el inicio de la toma de datos. El botón “Iniciar” da inicio a la recolección de datos y por ultimo “Detener” finaliza dicha recolección.

En la figura 34 se puede observar la interfaz gráfica realizada.

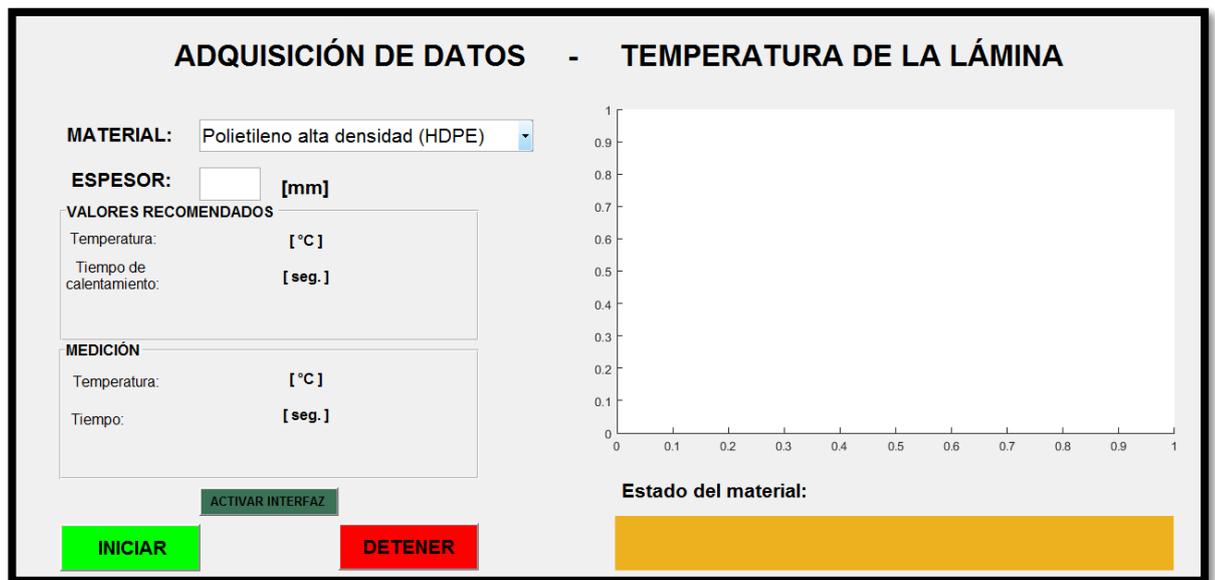


Figura 34. Interfaz gráfica del sistema de adquisición de datos

Fuente: Elaboración propia

El código generado en Matlab para realizar la programación de la interfaz gráfica se encuentra adjunto en el apéndice D de este documento.

3.6 Análisis de Costos

3.6.1 Costos Directos

Entre los costos que se asocian a la producción de la máquina de Termoformado, tenemos:

- Costo de equipos utilizados.
- Costo de materiales de construcción.
- Costo de Instrumentación.
- Costo de construcción.

Se observan los costos de los equipos utilizados en la tabla 15, en el mercado local no existen bombas de vacío de tan baja capacidad, por lo que se incluyen los gastos de envío en la cotización de la bomba Robinair 15115.

Tabla 15. Costo de equipos utilizados.

Equipos	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor Total (USD)
Resistencia Tipo tubular de Ø 3/8 in. 224 cm de longitud 2200 W 220 V	1	105.00	105.00
Bomba de Vacío Robinair VacuMaster 15115 1 Etapa 1.5 CFM 110 V	1	309.66	309.66
Tanque acumulador de vacío. Capacidad 20 Litros. Presión de diseño 29 in. Hg.	1	52.00	52.00
Subtotal			466.66
IVA (14%)			65.33
Valor total			531.99

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se observa en la tabla 16, los costos correspondientes a los materiales de construcción utilizados.

Tabla 16. Costo de materiales de construcción utilizados.

Materiales de construcción	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor Total (USD)
Perfil Angular 20x20x1.50 mm	1	3.84	3.84
Perfil Cuadrado 20x20x1.40 mm	1	5.37	5.37
Perfil Rectangular 12x25x0.75 mm	1	2.76	2.76
Perfil Redondo Ø 1/2 in. e: 0.90mm	1	2.01	2.01
Perfil Redondo Ø 7/8 in. e: 0.60mm	1	3.09	3.09
Pletina 1 x 1/8	1	3.16	3.16
Plancha laminada en frio 1220x2220x0.90 mm	1	16.77	16.77
Plancha perforada Ø3mm 1000X2000X0.70mm	1	38.85	38.35
Metro Mangueras Sistemas neumáticos Ø1/4in	2	0.78	1.56
Rieles Telescópicas 35 mm	1	8.44	8.44
Plancha Lana de vidrio 48x96x25.4	1	29.46	29.46
Bisagras galvanizadas 2" X 13 / 8"	4	0.74	2.98
Rodamiento KOYO EE4S2RSC3	2	8.06	16.12
Rodamiento NSK R14ZZCM	2	18.30	36.60
Resorte Co - Ni Ø 1 1/2in. e: 0.60mm l: 30mm	2	12.00	24.00
4u. Tornillo Galvanizado#12X1"	6	0.50	3.00
10u. Remaches Tipo POP 4X10	3	0.40	1.20
Kilo Electrodo AWS E6011	1	4.06	4.06
Galón Fondolac Fondo Nitro Blanco	1	7.68	7.68
Galón Thinner	2	1.25	2.50
Litro Esmalte brillante Azul	2	4.30	8.60
Papel de lija	3	0.40	1.20
Brocha 2"	2	1.75	3.50
Kilo Guaípe	1	1.00	1.00
Subtotal			227.25
IVA (14%)			31.81
Valor total			259.06

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la tabla 17 se observan los costos de instrumentación de la máquina de Termoformado.

Tabla 17. Costo de Instrumentación.

Equipos	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor Total (USD)
Válvula 2/2 NC – Ø1/4in	1	38.57	38.57
Vacuometro Medidor de presión de vacío Ø1/4in	1	29.40	29.40
Filtros de aire comprimido	2	25.35	50.70
Control de temperatura análogo 0 – 400° C	1	85.00	85.00
Termopar tipo FLUKE K 0-800 ° C Arduino	1	45.00	45.00
Tarjeta Arduino MEGA 2560	1	16.00	16.00
Transformador 120/12 Volts, 1 Amp.	1	6.58	6.58
Puente rectificador 1 Amp	1	0.65	0.65
Capacitor 2200Uf 25V	2	0.44	0.88
Regulador 7812	1	0.57	0.57
Regulador 7912	1	0.57	0.57
Amplificador AD 620	1	6.00	6.00
Potenciómetro 5KOhms	1	0.31	0.31
Bornera 3 Terminales	1	0.31	0.31
Baquelita virgen 10x10 cm	1	1.32	1.32
Funda de Percloruro	1	0.75	0.75
Subtotal			282.61
IVA (14%)			39.56
Valor total			322.17

Fuente: Elaboración propia

Se muestra el costo de construcción del proyecto en la tabla 18, tomando en cuenta que se necesita de un soldador y un ayudante general para el ensamble del equipo.

Tabla 18. Costo de construcción.

Trabajador	Horas de trabajo	Costo $\frac{\text{Hora}}{\text{Hombre}}$ (USD)	Valor Total (USD)
Soldador	16	3.39	54.24
Ayudante en general	10	3.22	32.20
Subtotal			86.44
IVA (14%)			12.10
Valor total			98.54

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la tabla 19, se muestra el costo directo total del proyecto.

Tabla 19. Costo directo total.

Tipos de costos directos	Valor (USD)
Costos de equipos utilizados.	531.99
Costos de materiales de construcción.	259.06
Costos de Instrumentación.	322.17
Costos de construcción.	98.54
Valor total	1211.76

Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Costos Indirectos.

Los costos indirectos se asocian con servicio de ingeniería (30% Costos directos) e insumos necesarios para culminar el proyecto (25% Costos directos), los valores obtenidos se observan en la tabla 20.

Tabla 20. Costo indirecto total.

Tipos de costos indirectos	Valor (USD)
Insumos	302.94
Servicio de Ingeniería	363.52
Valor total	666.46

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Costo Total del Proyecto.

En la tabla 21 se observa el costo total del proyecto, incluyendo los costos directos e indirectos.

Tabla 21. Costo total del proyecto

Tipos de costos	Valor (USD)
Costos directos	1211.76
Costos indirectos	666.46
Valor total	1878.22

Fuente: Elaboración propia

El proyecto tiene un costo final de \$1878.22 con todos los valores previamente descritos.

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El diseño de la máquina de Termoformado fue realizado acorde a los objetivos planteados, ofreciendo una herramienta de aprendizaje que ayude específicamente a la comprensión del proceso de termoformado de polímeros.

Se diseñó un sistema de calentamiento para elevar la temperatura de las láminas termoplásticas hasta su temperatura de formado. Este diseño se realizó en base a las láminas de polietileno de alta densidad y de poliestireno, siendo esta última la de mayor cuidado para el diseño del horno ya que al tener mayor densidad de masa, se necesita mayor energía para elevar su temperatura.

Se seleccionó un sistema de deformación sencillo donde se permita interactuar con la lámina deformada. Dicho sistema es el proceso denominado termoformado tipo Drape, donde se utilizan fuerzas de succión producidas por vacío, en conjunto con un molde macho. Mediante este proceso el usuario observa como el material adquiere la forma del molde mediante el vacío, a diferencia de otros procedimientos que implican equipos más complejos.

Al ser un equipo de laboratorio, los productos de los experimentos se limitan a objetos de dimensiones pequeñas. En base a estos requerimientos, la capacidad de bombeo del sistema de vacío es de apenas 1.5 CFM por cada ejercicio de Termoformado.

El sistema de control seleccionado se encarga de la medición de temperatura en la lámina de trabajo, dicho parámetro es fundamental para el entendimiento del termoformado. Por lo cual se complementa con una interfaz gráfica que ofrece información relevante del proceso al usuario de la máquina.

4.1 Conclusiones

Se estableció las dimensiones de las láminas a usar en la máquina de termoformado, de acuerdo a la disponibilidad de las mismas en el mercado local. Estas láminas serán de 300 x 300 milímetros.

La máquina está diseñada para trabajar con láminas termoplásticas de poliestireno (PS) y polietileno de alta densidad (HDPE), con un rango de espesores de 1 a 3 milímetros. Se puede trabajar con láminas termoplásticas distintas a las mencionadas, siempre y cuando se respete el rango de espesores y su densidad sea menor a la del poliestireno, dado que el diseño del horno está en función de la densidad mencionada.

Se realizó el diseño de un horno de calentamiento de acuerdo a las láminas termoplásticas con las que trabajará la máquina. Este sistema de calentamiento tiene una potencia de 2200 Watts lo cual satisface la demanda de energía necesaria para llevar las láminas desde su temperatura inicial hasta su temperatura de formado, considerando las pérdidas de calor a través de las paredes del horno, pérdidas por convección fuera del horno y perdidas por radiación.

Para deformar las láminas termoplásticas previamente calentada, se selecciona un sistema de vacío conformado por un generador y un tanque de acumulación. La generación está a cargo de una bomba de vacío con capacidad de bombeo de 1.5 CFM, dicha bomba no puede realizar la evacuación de aire en intervalos de tiempo cortos, por lo que se adiciona un tanque acumulador de vacío de 20 litros. Dicho sistema incluye la instrumentación necesaria para el funcionamiento del mismo.

La lámina termoplástica se calienta a temperaturas superiores a los 150°C. Por seguridad del estudiante, se diseña un mecanismo que transporte a la lámina desde su posición de calentamiento, hasta la mesa de formado. Este mecanismo de 1 grado de libertad transforma el

movimiento circular de una palanca en el movimiento lineal de un marco que contiene a la lámina.

Los perfiles de la estructura de la máquina de termoformado fueron seleccionados con la ayuda de catálogos de fabricantes locales. Esta estructura fue simulada en elementos finitos con las cargas que soporta, para determinar el máximo esfuerzo. El factor de seguridad obtenido fue de 35 lo cual asegura que la estructura no fallará. El alto valor del factor de seguridad se debe a que las cargas actuantes sobre la estructura son de baja magnitud.

Para el sistema de adquisición de datos se seleccionó un termopar tipo “K” por su amplia disponibilidad en el mercado local, además de su bajo costo. La señal de este sensor es adquirida mediante una tarjeta Arduino y enviada al software Matlab, en el cual se presentan los datos a través de una interfaz gráfica. En dicha interfaz, el usuario puede seleccionar el material de la lámina termoplástica y su espesor; además, se presentan los parámetros de deformados recomendados de acuerdo al material ingresado y se puede observar los valores medidos en tiempo real.

Se realizó una guía de laboratorio donde consta el procedimiento experimental para realizar la práctica. Donde se detallan los pasos a seguir para el correcto funcionamiento del equipo, sin descuidar la integridad física del usuario.

A través de un software CAD, se realizó el modelo 3D de la máquina de termoformado diseñada, además de una animación que representa el funcionamiento de la misma.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda colocar señalética que advierta que el horno se encuentra a temperaturas elevadas, con la finalidad de que el usuario no entre en contacto con el mismo.

El tiempo de aplicación de vacío en el sistema debe estar correctamente calibrado, en este caso la válvula 2/2 NC debe estar ajustada para permitir el paso de vacío desde el tanque, durante un periodo de tiempo de 8 segundos.

La bomba de vacío debe permanecer encendida durante la operación de la máquina, con el fin de suplir el vacío utilizado por cada operación. Dicha deficiencia se manifiesta al realizarse la succión proveniente del tanque, la presión interna del mencionado baja drásticamente y este debe regresar a su valor absoluto de 14.7 psi.

Antes de poner en marcha la máquina de termoformado, y, por ende, su sistema de adquisición de datos, es necesario calibrar el termopar "K" para tener una correcta adquisición de datos.

Al correr el código de Matlab para iniciar la interfaz gráfica, es necesario verificar el nombre del puerto que se asigna automáticamente a la tarjeta Arduino. El nombre de este puerto debe coincidir con el que se encuentra en el código. Caso contrario, se debe colocar el nombre del puerto, asignado automáticamente, en el código de Matlab.

Se recomienda seguir el procedimiento estipulado en la guía de laboratorio del apéndice F. Dicha guía está elaborada con el fin de que no existan riesgos para la integridad física del usuario.

BIBLIOGRAFÍA

1. Frank Kreith, R. M. (2011). *Principles of Heat Transfer, Seventh Edition*. Stamford: Cengage Learning.
2. Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor, 4a. ed.* México: PRENTICE HALL.
3. MARKS. (1986). *Manual del Ingeniero Mecánico, Volumen III*. México: McGraw Hill, Inc, U.S.A.
4. MULTIFAB INCORPORATED. (2009). *THERMOFORMING DESIGN GUIDELINES*. Spokane: Empresa desc.
5. Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas, Un enfoque integrado, 4a. ed.* México: Pearso Educación.
6. Phulé, D. R. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales, 4a. ed.* México, D.F.: International Thomson Editores, S.A.
7. Plastigas de Mexico, S.A. de C.V. (2012). *Manual Tecnico de Termoformado*. Ciudad de Mexico: Empresa desc.
8. Society of the Plastics Industry. (1991). *Plastics Engineering Hanbook Of The Society of the Plastics Industry/[edited by] Michael L. Berins, 5th ed.* New York: Springer Science & Business Media.
9. Throne, J. L. (1996). *Technology of Thermoforming*. Cincinnati: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG .

APÉNDICES

Apéndice A – Sistema de calentamiento

Tiempo de calentamiento de las láminas

El tiempo de exposición de las láminas termoplásticas se lo obtuvo mediante la ecuación 2.4:

$$\frac{m_L * C_p * (T_{i+1} - T_i)}{\Delta t} = A_1 F_{12} * \sigma * \left[T^4 - \left(\frac{T_{i+1} + T_i}{2} \right)^4 \right]$$

Donde m_L representa la masa de la lámina. A manera de ejemplo, se calcula la masa de la lámina de poliestireno, cuya densidad y dimensiones son:

$$\rho_{poliestireno} = 1.05 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$x = 35 [cm]$$

$$y = 35 [cm]$$

$$e = 0.3 [cm]$$

$$m_L = x * y * e * \rho_{poliestireno} = 35 * 35 * 0.3 * 1.05 = 385.9 [g] = 0.3859 [kg]$$

El calor específico del poliestireno es:

$$C_p = 1200 \left[\frac{J}{Kg - K} \right]$$

La temperatura inicial de la lámina, para la primera iteración, corresponde a la temperatura ambiente; y, para el caso crítico, se la ha fijado en:

$$T_i = 16 [^{\circ}C] = 289 [K]$$

La temperatura del calentador es:

$$T = 450 [^{\circ}C] = 723 [K]$$

El término $A_1 F_{12}$ está dado por la ecuación 2.3:

$$A_1 F_{12} = \frac{1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 * A} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 * A} + \frac{1}{A * \left[\frac{F_{1-2} + 1}{2} \right]}}$$

Donde ε_1 es la emisividad del calentador cuyo valor es de 0.9 al igual que la emisividad de la lámina, ε_2 . El área del calentador y de la lámina es de 0.1225 [m²] y el factor de visión entre ambos (F_{1-2}), obtenido de la figura 15, es 0.594. Reemplazando valores en la anterior ecuación, se tiene:

$$A_1 F_{12} = \frac{1}{\frac{1 - 0.9}{0.9 * 0.1225} + \frac{1 - 0.9}{0.9 * 0.1225} + \frac{1}{0.1225 * \left[\frac{0.594 + 1}{2} \right]}} = 0.08294 \text{ [m}^2\text{]}$$

La constante de Stefan – Boltzmann es:

$$\sigma = 5.67E - 8 \left[\frac{W}{m^2 - K^4} \right]$$

El incremento de tiempo, para realizar las iteraciones, es de:

$$\Delta t = 1 \text{ [seg]}$$

Entonces, reemplazando valores en la ecuación 2.4, se puede despejar la temperatura de la lámina después del incremento de tiempo establecido:

$$\frac{0.3859 * 1200 * (T_{i+1} - 289)}{1} = 0.08294 * 5.67 * 10^{-8} * \left[723^4 - \left(\frac{T_{i+1} + 289}{2} \right)^4 \right]$$

$$T_{i+1} = 291.7 \text{ [K]}$$

Para la siguiente iteración, el valor de temperatura inicial será igual al que se calculó en la anterior iteración. De esta forma, se realizan tantas iteraciones hasta llegar al valor de temperatura de formado del material correspondiente. En las siguientes tablas se muestran los resultados de las iteraciones hasta alcanzar las temperaturas de formado de cada material.

Tabla 22. Iteraciones para poliestireno (PS) de 3 mm de espesor

PS, e=3mm, D=10cm, T=450°C		
t	T_i	T_{i+1}
0	-	289
1	289	291,7
2	291,7	294,4
3	294,4	297,1
4	297,1	299,8
5	299,8	302,5
6	302,5	305,2
7	305,2	307,9
8	307,9	310,6
9	310,6	313,3
10	313,3	316
11	316	318,7
12	318,7	321,4
13	321,4	324,1
14	324,1	326,8
15	326,8	329,5
16	329,5	332,2
17	332,2	334,9
18	334,9	337,6
19	337,6	340,3
20	340,3	343
21	343	345,7
22	345,7	348,4
23	348,4	351,1
24	351,1	353,8
25	353,8	356,5
26	356,5	359,2
27	359,2	361,9
28	361,9	364,6
29	364,6	367,3
30	367,3	370
31	370	372,7
32	372,7	375,4
33	375,4	378,1
34	378,1	380,8
35	380,8	383,5
36	383,5	386,2
37	386,2	388,9
38	388,9	391,6
39	391,6	394,3

40	394,3	397
41	397	399,7
42	399,7	402,4
43	402,4	405,1
44	405,1	407,8
45	407,8	410,5
46	410,5	413,2
47	413,2	415,9
48	415,9	418,6
49	418,6	421,3
50	421,3	424
51	424	426,7
52	426,7	429,4
53	429,4	432,1
54	432,1	434,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Iteraciones para poliestireno (PS) de 2 mm de espesor

PS, e=2mm, D=10cm, T=450°C		
t	T_i	T_{i+1}
0	-	289
1	289	293,1
2	293,1	297,1
3	297,1	301,1
4	301,1	305,1
5	305,1	309,14
6	309,14	313,16
7	313,16	317,18
8	317,18	321,2
9	321,2	325,22
10	325,22	329,24
11	329,24	333,26
12	333,26	337,28
13	337,28	341,3
14	341,3	345,32
15	345,32	349,34
16	349,34	353,36
17	353,36	357,38
18	357,38	361,4
19	361,4	365,42
20	365,42	369,44
21	369,44	373,46

22	373,46	377,48
23	377,48	381,5
24	381,5	385,52
25	385,52	389,54
26	389,54	393,56
27	393,56	397,58
28	397,58	401,6
29	401,6	405,62
30	405,62	409,64
31	409,64	413,66
32	413,66	417,68
33	417,68	421,7
34	421,7	425,72
35	425,72	429,74
36	429,74	433,76

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Iteraciones para poliestireno (PS) de 1.5 mm de espesor

PS, e=1,5mm, D=10cm, T=450°C		
t	T_i	T_{i+1}
0	-	289
1	289	294,4
2	294,4	299,8
3	299,8	305,2
4	305,2	310,6
5	310,6	316
6	316	321,4
7	321,4	326,8
8	326,8	332,2
9	332,2	337,6
10	337,6	343
11	343	348,4
12	348,4	353,8
13	353,8	359,2
14	359,2	364,6
15	364,6	370
16	370	375,4
17	375,4	380,8
18	380,8	386,2
19	386,2	391,6
20	391,6	397
21	397	402,4

22	402,4	407,8
23	407,8	413,2
24	413,2	418,6
25	418,6	424
26	424	429,4
27	429,4	434,8
28	434,8	440,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Iteraciones para poliestireno (PS) de 1 mm de espesor

PS, e=1mm, D=10cm, T=450°C		
t	Ti	Ti+1
0	-	289
1	289	297,1
2	297,1	305,2
3	305,2	313,2
4	313,2	321,2
5	321,2	329,29
6	329,29	337,34
7	337,34	345,39
8	345,39	353,44
9	353,44	361,49
10	361,49	369,54
11	369,54	377,59
12	377,59	385,64
13	385,64	393,69
14	393,69	401,74
15	401,74	409,79
16	409,79	417,84
17	417,84	425,89
18	425,89	433,94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Iteraciones para polietileno (PE) de 3 mm de espesor

PE, e=3mm, D=10cm, T=450°C		
t	Ti	Ti+1
0,00	-	289,00
1,00	289,00	290,90
2,00	290,90	292,80
3,00	292,80	294,70
4,00	294,70	296,60
5,00	296,60	298,50

6,00	298,50	300,40
7,00	300,40	302,30
8,00	302,30	304,20
9,00	304,20	306,10
10,00	306,10	308,00
11,00	308,00	309,90
12,00	309,90	311,80
13,00	311,80	313,70
14,00	313,70	315,60
15,00	315,60	317,50
16,00	317,50	319,40
17,00	319,40	321,30
18,00	321,30	323,20
19,00	323,20	325,10
20,00	325,10	327,00
21,00	327,00	328,90
22,00	328,90	330,80
23,00	330,80	332,70
24,00	332,70	334,60
25,00	334,60	336,50
26,00	336,50	338,40
27,00	338,40	340,30
28,00	340,30	342,20
29,00	342,20	344,10
30,00	344,10	346,00
31,00	346,00	347,90
32,00	347,90	349,80
33,00	349,80	351,70
34,00	351,70	353,60
35,00	353,60	355,50
36,00	355,50	357,40
37,00	357,40	359,30
38,00	359,30	361,20
39,00	361,20	363,10
40,00	363,10	365,00
41,00	365,00	366,90
42,00	366,90	368,80
43,00	368,80	370,70
44,00	370,70	372,60
45,00	372,60	374,50
46,00	374,50	376,40
47,00	376,40	378,30
48,00	378,30	380,20
49,00	380,20	382,10

50,00	382,10	384,00
51,00	384,00	385,90
52,00	385,90	387,80
53,00	387,80	389,70
54,00	389,70	391,60
55,00	391,60	393,50
56,00	393,50	395,40
57,00	395,40	397,30
58,00	397,30	399,20
59,00	399,20	401,10
60,00	401,10	403,00
61,00	403,00	404,90
62,00	404,90	406,80
63,00	406,80	408,70
64,00	408,70	410,60
65,00	410,60	412,50
66,00	412,50	414,40
67,00	414,40	416,30
68,00	416,30	418,20
69,00	418,20	420,10
70,00	420,10	422,00
71,00	422,00	423,90
72,00	423,90	425,80
73,00	425,80	427,70
74,00	427,70	429,60
75,00	429,60	431,50
76,00	431,50	433,40
77,00	433,40	435,30
78,00	435,30	437,20
79,00	437,20	439,10
80,00	439,10	441,00
81,00	441,00	442,90
82,00	442,90	444,80

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Iteraciones para polietileno (PE) de 2 mm de espesor

PE, e=2mm, D=10cm, T=450°C		
t	T_i	T_{i+1}
0,00	-	289,00
1,00	289,00	291,80
2,00	291,80	294,60
3,00	294,60	297,40
4,00	297,40	300,20

5,00	300,20	303,00
6,00	303,00	305,80
7,00	305,80	308,60
8,00	308,60	311,40
9,00	311,40	314,20
10,00	314,20	317,00
11,00	317,00	319,80
12,00	319,80	322,60
13,00	322,60	325,40
14,00	325,40	328,20
15,00	328,20	331,00
16,00	331,00	333,80
17,00	333,80	336,60
18,00	336,60	339,40
19,00	339,40	342,20
20,00	342,20	345,00
21,00	345,00	347,80
22,00	347,80	350,60
23,00	350,60	353,40
24,00	353,40	356,20
25,00	356,20	359,00
26,00	359,00	361,80
27,00	361,80	364,60
28,00	364,60	367,40
29,00	367,40	370,20
30,00	370,20	373,00
31,00	373,00	375,80
32,00	375,80	378,60
33,00	378,60	381,40
34,00	381,40	384,20
35,00	384,20	387,00
36,00	387,00	389,80
37,00	389,80	392,60
38,00	392,60	395,40
39,00	395,40	398,20
40,00	398,20	401,00
41,00	401,00	403,80
42,00	403,80	406,60
43,00	406,60	409,40
44,00	409,40	412,20
45,00	412,20	415,00
46,00	415,00	417,80
47,00	417,80	420,60
48,00	420,60	423,40

49,00	423,40	426,20
50,00	426,20	429,00
51,00	429,00	431,80
52,00	431,80	434,60
53,00	434,60	437,40
54,00	437,40	440,20
55,00	440,20	443,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Iteraciones para polietileno (PE) de 1.5 mm de espesor

PE, e=1,5mm, D=10cm, T=450°C		
t	Ti	Ti+1
0,00	-	289,00
1,00	289,00	292,80
2,00	292,80	296,60
3,00	296,60	300,40
4,00	300,40	304,20
5,00	304,20	307,90
6,00	307,90	311,60
7,00	311,60	315,30
8,00	315,30	319,14
9,00	319,14	322,90
10,00	322,90	326,66
11,00	326,66	330,42
12,00	330,42	334,18
13,00	334,18	337,94
14,00	337,94	341,70
15,00	341,70	345,46
16,00	345,46	349,22
17,00	349,22	352,98
18,00	352,98	356,74
19,00	356,74	360,50
20,00	360,50	364,26
21,00	364,26	368,02
22,00	368,02	371,78
23,00	371,78	375,54
24,00	375,54	379,30
25,00	379,30	383,05
26,00	383,05	386,81
27,00	386,81	390,57
28,00	390,57	394,33
29,00	394,33	398,09
30,00	398,09	401,85
31,00	401,85	405,61
32,00	405,61	409,37
33,00	409,37	413,13
34,00	413,13	416,89
35,00	416,89	420,65
36,00	420,65	424,41
37,00	424,41	428,17
38,00	428,17	431,93
39,00	431,93	435,69

40,00	435,69	439,45
41,00	439,45	443,21

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Iteraciones para polietileno (PE) de 1 mm de espesor

PE, e=1mm, D=10cm, T=450°C		
t	T_i	T_{i+1}
0,00	-	289,00
1,00	289,00	294,70
2,00	294,70	300,30
3,00	300,30	305,90
4,00	305,90	311,50
5,00	311,50	317,10
6,00	317,10	322,70
7,00	322,70	328,33
8,00	328,33	333,94
9,00	333,94	339,55
10,00	339,55	345,16
11,00	345,16	350,77
12,00	350,77	356,38
13,00	356,38	361,99
14,00	361,99	367,60
15,00	367,60	373,21
16,00	373,21	378,83
17,00	378,83	384,44
18,00	384,44	390,05
19,00	390,05	395,66
20,00	395,66	401,27
21,00	401,27	406,88
22,00	406,88	412,49
23,00	412,49	418,10
24,00	418,10	423,71
25,00	423,71	429,32
26,00	429,32	434,93
27,00	434,93	440,54
28,00	440,54	446,15

Fuente: Elaboración propia

En la última fila de las tablas anteriores la iteración se detiene dado que alcanza la temperatura de formado de las láminas. Además se puede observar el tiempo que demoran las láminas en llegar desde la temperatura inicial hasta la temperatura de formado.

Temperatura en las paredes del horno

Las temperaturas de las paredes del horno, como se muestra en la figura, se las obtuvo de la siguiente forma:

La temperatura T_1 fue asumida igual a la temperatura de calentamiento, es decir, 450°C . La temperatura T_4 se fijó en 50°C de modo que el estudiante o la persona que trabaje con la máquina, no sufra quemaduras en caso de tocar accidentalmente el horno.

El flujo de calor a través de las paredes del horno se obtuvo con la ecuación 2.5:

$$q = \frac{T_4 - T_{amb}}{\frac{1}{h_c * A_{wall}}}$$

El área de la pared del horno es:

$$A_{wall} = 0.35 * 0.1 = 0.035 [m^2]$$

El coeficiente de convección está asociado al número de Nusselt, la conductividad del aire y la longitud característica de la pared. El último parámetro mencionado está dado por la razón entre el área de la pared y su perímetro.

El número de Nusselt se lo obtiene de la ecuación 2.20, misma que es válida para el intervalo de $Gr*Pr \leq 10^9$. Además, las propiedades del aire para determinar este parámetro adimensional, son evaluadas a la temperatura de película, esto es:

$$T_{film} = \frac{T_4 + T_{amb}}{2} = \frac{289 + 323}{2} = 306 [K]$$

$$\text{Nusselt} = 0,68 + \frac{0,67 * (\text{Gr} * \text{Pr})^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{\text{Pr}}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}$$

El número de Grashof está dado por:

$$\text{Gr} = T_{\text{film}} * \beta * \frac{L^3 * \rho_{\text{air}}^2 * g}{\nu^2} = 306 * 289^{-1} * \frac{\left(\frac{0.035}{0.9}\right)^3 * 1.154^2 * 9.8}{(16.32 * 10^{-6})^2} = 3.05E6$$

El número de Prandtl, asociado a la temperatura de película, es:

$$\text{Pr} = 0.7066$$

Reemplazando los valores, el número de Nusselt es:

$$\text{Nusselt} = 0,68 + \frac{0,67 * (3.05E6 * 0.7066)^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,942}{0.7066}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} = 20.37$$

El coeficiente de convección es:

$$h_c = \frac{\text{Nusselt} * k_{\text{air}}}{L} = \frac{20.37 * 0.02683}{\frac{0.035}{0.9}} = 14.05 \left[\frac{W}{m^2 - K} \right]$$

Reemplazando valores para calcular el flujo de calor a través de las paredes, se tiene:

$$q = \frac{323 - 289}{\frac{1}{14.05 * 0.035}} = 16.72 [W]$$

El espesor de la pared exterior es de 1 mm y la conductividad térmica es de 58 W/m-K, entonces de la ecuación 2.6, despejando T₃, se tiene:

$$16.72 = \frac{T_3 - 323}{\frac{0.001}{58 * 0.035}}$$

$$T_3 = 323.01 [K] = 50.01 [^{\circ}C]$$

De la ecuación 2.7, despejando T_2 , se tiene:

$$16.72 = \frac{723 - T_2}{\frac{0.001}{58 * 0.035}}$$

$$T_2 = 722.99 [K] = 449.99 [^{\circ}C]$$

Esesor del aislante

El aislante seleccionado fue lana de vidrio por su fácil acceso en el mercado y su bajo costo. Sus características son:

$$\rho_{aislante} = 32 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$C_{p-aislante} = 835 \left[\frac{J}{kg - K} \right]$$

$$k_{aislante} = 0.034 \left[\frac{W}{m - K} \right]$$

El esesor del aislante fue calculado a través de la ecuación 2.8, despejando e_2 :

$$q = \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_2}{k_{isolated} * A_{wall}}}$$

$$16.72 = \frac{722.99 - 323.01}{\frac{e_2}{0.034 * 0.035}}$$

$$e_2 = 0.028 [m] = 2.8 [cm] \approx 3 [cm]$$

Energía para calentar la lámina

La energía necesaria para elevar la temperatura de la lámina termoplástica, está dada por la ecuación 2.9:

$$Q_c = \frac{m_L * C_p * (T_b - T_a)}{\text{tiempo}} = \frac{0.3859 * 1200 * (433 - 289)}{54} = 1234.8 [W]$$

Este valor se calculó para la lámina de mayor peso ya que esta demanda mayor energía para calentarla.

Pérdidas de calor

Las pérdidas de calor por **conducción** están dadas por las ecuaciones 2.16, 2.17 y 2.18:

$$Q_{w1} = \frac{m_{w1} * C_{p\text{steel}} * \Delta T_{w1}}{\text{tiempo}}$$
$$Q_{w1} = \frac{(0.35 * 0.1 * 0.001 * 7850) * (460) * (723 - 289)}{82}$$
$$Q_{w1} = 668.9 [W]$$

$$Q_{w2} = \frac{m_{w2} * C_{p\text{isulated}} * \Delta T_{w2}}{\text{tiempo}}$$
$$Q_{w2} = \frac{(0.35 * 0.1 * 0.03 * 32) * (835) * (523 - 289)}{82}$$
$$Q_{w2} = 75.95 [W]$$

$$Q_{w3} = \frac{m_{w3} * C_{p\text{steel}} * \Delta T_{w3}}{\text{tiempo}}$$
$$Q_{w3} = \frac{(0.35 * 0.1 * 0.001 * 7850) * (460) * (323 - 289)}{82}$$
$$Q_{w3} = 52.41 [W]$$

En las anteriores ecuaciones se evaluó la energía disipada por las paredes con respecto al ambiente.

Las pérdidas de calor por **convección** están dadas por las ecuaciones 2.22 y 2.23, para las paredes laterales y la pared superior respectivamente:

$$Q_{\text{conv-lat}} = A_{\text{wall}} * h_c * (T_4 - T_{\text{amb}})$$

$$Q_{\text{conv-lat}} = 0.035 * 14.05 * (323 - 289)$$

$$Q_{\text{conv-lat}} = 16.72 \text{ [W]}$$

$$Q_{\text{conv-top}} = \text{largo} * \text{largo} * h_c * (T_4 - T_{\text{amb}})$$

$$Q_{\text{conv-top}} = 0.35 * 0.35 * 14.05 * (323 - 289)$$

$$Q_{\text{conv-top}} = 58.52 \text{ [W]}$$

La pérdida de calor por **radiación** está dada por la ecuación 2.24:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon * \sigma * A_{\text{wall}} * (T_4^4 - T_{\text{amb}}^4)$$

$$Q_{\text{rad}} = 0.9 * 5.67 \times 10^{-8} * 0.035 * (323^4 - 289^4)$$

$$Q_{\text{rad}} = 6.98 \text{ [W]}$$

La pérdida total de calor es:

$$Q_p = Q_{w1} + Q_{w2} + Q_{w3} + Q_{\text{conv-lat}} + Q_{\text{conv-top}} + Q_{\text{rad}}$$

$$Q_p = 668.9 + 75.95 + 52.41 + 16.72 + 58.52 + 6.98$$

$$Q_p = 879.5 \text{ [W]}$$

Potencia del horno

La potencia del horno está dada por la suma de la energía que se requiere para calentar la lámina termoplástica y las pérdidas de calor:

$$Q_{\text{furnace}} = Q_c + Q_p$$

$$Q_{\text{furnace}} = 1234.8 + 879.5$$

$$Q_{\text{furnace}} = 2114 \text{ [W]}$$

El calentador debe ser capaz de suministrar, mínimo, 2114 vatios. Para ello se ha implementado una resistencia tubular eléctrica con diámetro de 3/8" (9mm) la cual entrega 2.2 kW en una longitud de 224 cm.

Apéndice B – Sistema de vacío

Calculo Relación de áreas Lámina – Objeto

Se tienen las siguientes dimensiones para el cálculo de la Relación de áreas.

$$L = 280 \text{ mm}$$

$$W = 280 \text{ mm}$$

$$H = 70 \text{ mm}$$

Donde.

L. Largo de la base del objeto deformado

W. Ancho de la base del objeto deformado

H. Altura del objeto deformado

Se fija una altura de 70 mm debido a las dimensiones de la máquina de Termoformado, así se evitan problemas debido a contacto con otros equipos.

Para el proceso de Termoformado se recomienda una relación de áreas igual a 3, según (Multifab Incorporated, Thermoforming design guideline, 2009). Esta relación se puede comprobar mediante la siguiente ecuación.

$$AR = \frac{A_p}{A_s}$$

Donde.

AR. Relación de áreas.

A_p. Área de la pieza.

A_s. Área de la lámina.

El área de la pieza se calcula mediante la ecuación.

$$A_p = 2LH + 2WH + LW$$

$$A_p = 2(280)(70) + 2(280)(70) + (280)(280)$$

$$A_p = 156800 \text{ mm}^2$$

Y a su vez el área de la lámina se calcula mediante la ecuación.

$$A_s = LW$$

$$A_s = (280)(280)$$

$$A_p = 78400 \text{ mm}^2$$

Se calcula la relación de áreas mediante la ecuación.

$$AR = \frac{A_p}{A_s}$$

$$AR = \frac{156800}{78400}$$

$$AR = 2$$

Como se observa, las dimensiones finales del molde a utilizar cumplen con la recomendación referente a las relaciones de estiramiento del Termoformado.

Calculo Volumen total de aire a desplazar por el generador de vacío.

Se calcula el volumen del objeto deformado con los siguientes valores.

$$L = 280 \text{ mm}$$

$$W = 280 \text{ mm}$$

$$H = 70 \text{ mm}$$

Donde.

L. Largo de la base del objeto deformado

W. Ancho de la base del objeto deformado

H. Altura del objeto deformado

$$V_{\text{objeto}} = LHW$$

$$V_{\text{objeto}} = (280)(280)(70)$$

$$V_{\text{objeto}} = 54.88 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Se calcula el volumen de la mesa de vacío con los siguientes valores.

$$L_{\text{mesa}} = 280 \text{ mm}$$

$$W_{\text{mesa}} = 280 \text{ mm}$$

$$H_{\text{mesa}} = 25 \text{ mm}$$

Donde.

L_{mesa}. Largo de la mesa de vacío.

W_{mesa}. Ancho de la mesa de vacío.

H_{mesa}. Altura de la mesa de vacío.

$$V_{\text{mesa}} = L_{\text{mesa}}H_{\text{mesa}}W_{\text{mesa}}$$

$$V_{\text{mesa}} = (280)(280)(25)$$

$$V_{\text{mesa}} = 19.60 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Se calcula el volumen de las mangueras utilizadas con los siguientes valores.

$$d = \frac{1}{4} \text{ in} = 6.35 \text{ mm}$$

$$l = 2000 \text{ mm}$$

Donde.

d. Diámetro de la manguera.

l. Longitud de la manguera.

$$V_{\text{manguera}} = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 l$$

$$V_{\text{manguera}} = \pi \left(\frac{6.35}{2}\right)^2 (2000)$$

$$V_{\text{manguera}} = 63.22 \times 10^3 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Se calcula el volumen total de aire a desplazar por el generador de vacío mediante la fórmula.

$$V_{\text{total}} = V_{\text{objeto}} + V_{\text{mesa}} + V_{\text{manguera}}$$

$$V_{\text{total}} = 54.88 \times 10^5 + 19.68 \times 10^5 + 63.22 \times 10^3$$

$$V_{\text{total}} = 75.11 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Calculo capacidad de bombeo del generador de vacío.

Para el presente cálculo se fijan los siguientes valores.

$$V_{\text{total}} = 75.11 \times 10^5 \text{ mm}^3 = 0.265 \text{ ft}^3$$

$$t = 8 \text{ sg.} = 0.133 \text{ min.}$$

$$P_1 = 22.91 \text{ inHg}$$

$$P_2 = 29 \text{ inHg}$$

Donde.

V_{total} . Volumen total de aire a desplazar.

t. Tiempo estimado de aplicación de vacío.

P_1 . Presión atmosférica.

P_2 . Presión de vacío para procesos de Termoformado.

Se fija el valor de presión de vacío para procesos de Termoformado en 29 in Hg, según (Multifab Incorporated, Thermoforming design guideline, 2009). Se

calcula la capacidad de bombeo S_p según la ecuación tomada de (Marks, Manual del Ingeniero Mecánico, 1984).

$$S_p = \frac{V}{t} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

$$S_p = \frac{0.265}{0.133} \ln \left(\frac{22.91}{29} \right)$$

$$S_p = 0.204 \text{ ft}^3/\text{min} = 0.204 \text{ CFM}$$

Calculo capacidad de tanque acumulador de vacío.

Para el presente cálculo se necesita del siguiente valor.

$$V_{total} = 75.11 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Donde.

V_{total} . Volumen total de aire a desplazar.

Según (Plastiglas, Manual Técnico de Termoformado) para aplicaciones de Termoformado se necesita de un tanque acumulador de vacío con capacidad V_{tanque} según la siguiente ecuación.

$$V_{tanque} = 2.5 V_{total}$$

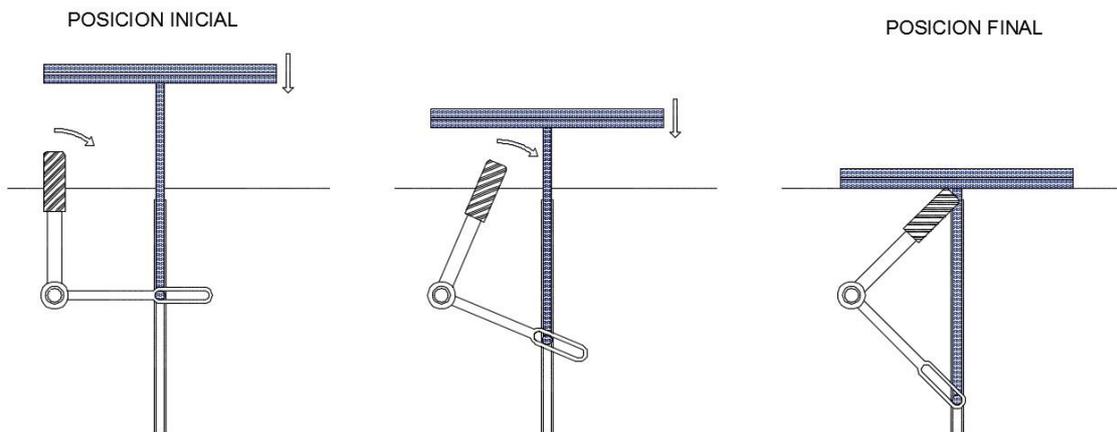
$$V_{tanque} = 2.5 (75.11 \times 10^5)$$

$$V_{tanque} = 187.77 \times 10^5 \text{ mm}^3 = 18.77 \text{ lt}$$

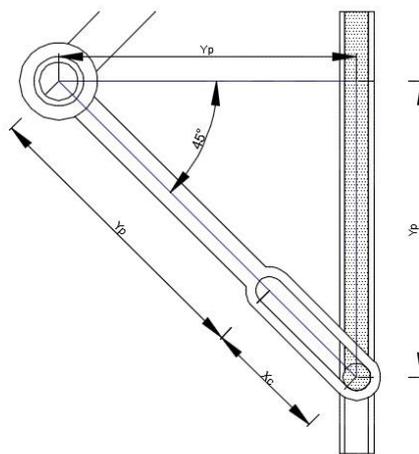
Apéndice C – Mecanismo de movimiento

Calculo Longitud de corredera del mecanismo de movimiento.

Para que el marco de sujeción se pueda mover en dirección vertical, es necesario restringir el movimiento del pin que mueve dicha plataforma. Esto se logra limitando la longitud de la corredera del brazo que mueve angularmente al mecanismo, como se observa en la figura.



Dicha longitud de la corredera X_c se calcula, realizando una relación de triángulos y aplicando el Teorema de Pitágoras, donde:



$$Y_p = 150 \text{ mm}$$

Donde.

Y_p . Longitud que debe bajar la plataforma.

$$Y_p + X_c = \sqrt{Y_p^2 + Y_p^2}$$

$$X_c = \sqrt{150^2 + 150^2} - 150$$

$$X_c = 62.13 \text{ mm}$$

Calculo Selección del Resorte.

Para la selección del resorte se necesitan de los siguientes valores.

$$W_m = 10.38 \text{ N}$$

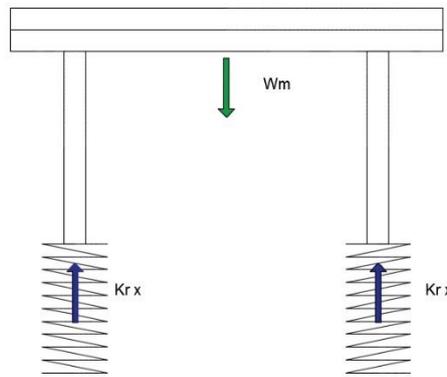
$$\Delta Y = 50 \text{ mm}$$

Donde.

W_m . Peso del marco de sujeción.

ΔY . Deformación máxima del resorte.

Como se observa en el Diagrama de cuerpo libre, existen dos resortes que soportan la carga inicial del peso de marco de sujeción. Por lo tanto, la sumatoria de fuerzas será.



$$\sum F = 0$$

$$2k_r \Delta Y - W_m = 0$$

Se despeja la constante del resorte k_r , para su posterior selección.

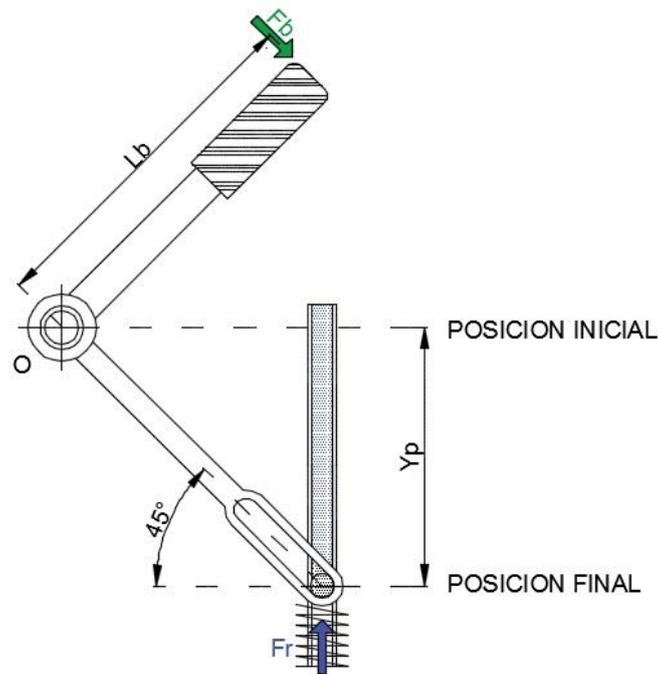
$$k_r = \frac{W_m}{2\Delta Y}$$

$$k_r = \frac{10.38}{2(50)}$$

$$K_r = 0.103 \text{ N/mm}$$

Calculo Longitud del brazo

Se observa el siguiente diagrama de cuerpo libre para el mecanismo de movimiento en su posición final.



Con los siguientes valores:

$$F_b = 68.6 \text{ N}$$

$$Y_p = 150 \text{ mm}$$

$$k_r = 0.109 \text{ N/mm}$$

Donde.

F_b . Fuerza del brazo humano.

Y_p . Longitud que debe bajar la plataforma.

k_r . Constante del resorte seleccionado.

Se realiza la sumatoria de momentos con respecto al punto O, tomando en cuenta que están actuando 2 resortes.

$$\sum M_O = 0$$

$$-F_b L_b + 2F_r Y_p = 0$$

$$-F_b L_b + 2k_r Y_p^2 = 0$$

Se despeja la longitud del brazo L_b , y se calcula dicha longitud de palanca para comodidad del usuario.

$$L_b = \frac{2k_r Y_p^2}{F_b}$$

$$L_b = \frac{2(0.109)(150)^2}{(68.6)}$$

$$L_b = 67.56 \text{ mm}$$

Apéndice D – Sistema de adquisición de datos

A continuación, se presenta el código elaborado en Matlab para poder ejecutar la interfaz gráfica para la adquisición de datos:

```
function varargout = Example1(varargin)
% EXAMPLE1 MATLAB code for Example1.fig
%     EXAMPLE1, by itself, creates a new EXAMPLE1 or raises the
existing
%     singleton*.
%
%     H = EXAMPLE1 returns the handle to a new EXAMPLE1 or the handle
to
%     the existing singleton*.
%
%     EXAMPLE1('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the
local
%     function named CALLBACK in EXAMPLE1.M with the given input
arguments.
%
%     EXAMPLE1('Property','Value',...) creates a new EXAMPLE1 or
raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value
pairs are
%     applied to the GUI before Example1_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
application
%     stop. All inputs are passed to Example1_OpeningFcn via
varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows
only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Example1

% Last Modified by GUIDE v2.5 06-Feb-2017 06:37:37

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Example1_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Example1_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
```

```

% --- Executes just before Example1 is made visible.
function Example1_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Example1 (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Example1
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Example1 wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
delete(instrfind({'Port'}, {'COM3'}))
clear a;
global a;
a = arduino('COM3');
a.pinMode(13, 'output');

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Example1_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in turn_on_button.
function turn_on_button_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to turn_on_button (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
a.digitalWrite(13,1);

% --- Executes on button press in turn_off_button.
function turn_off_button_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to turn_off_button (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
global d;
a.digitalWrite(13,0);
d=0;

% --- Executes on button press in read_button.
function read_button_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to read_button (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global k a;
x=0;
global d;

```

```

for k=1:1:90
    b=a.analogRead(0)*0.00488/0.01;
    if b<40 %temperatura mínima
        set(handles.s3,'string','Temperatura insuficiente');
    elseif b>50 %temperatura maxima
        set(handles.s3,'string','Peligro de degradación');
    else
        set(handles.s3,'string','Apto para deformar');
    end
    x=[x,b];
    plot(x,'LineWidth',2); grid on;
    axis([0 90 0 170]);
    xlabel('tiempo [s]');
    ylabel('Temperatura [*C]');
    set(handles.tm,'string',b);
    set(handles.tr,'string',k);
    if d==0
        break
    end
    pause(1);
end

```

```

function edit_text_samples_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit_text_samples (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit_text_samples
as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit_text_samples as a double
handles.data1=get(hObject,'String');
handles.xSamples=str2double(handles.data1);
guidata(hObject,handles);

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit_text_samples_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit_text_samples (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function temperatura_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to temperatura (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of temperatura as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
temperatura as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function temperatura_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to temperatura (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function tiempo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to tiempo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of tiempo as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of tiempo
as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function tiempo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to tiempo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in menu.
function menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to menu (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns menu
contents as cell array

```

```

%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
menu
v=get(handles.menu,'value');
switch v
    case 1 %polietileno
        if handles.xSamples==3
            set(handles.s1,'string', 160);%temperatura
            set(handles.s2,'string', 54); %tiempo
        elseif handles.xSamples==2
            set(handles.s1,'string', 160);
            set(handles.s2,'string', 36);
        elseif handles.xSamples==1.5
            set(handles.s1,'string', 160);
            set(handles.s2,'string', 28);
        elseif handles.xSamples==1
            set(handles.s1,'string', 160);
            set(handles.s2,'string', 18);
        else
            set(handles.s1,'string', 'Valor inadecuado');
            set(handles.s2,'string', 'Valor inadecuado');
        end

        otherwise %poliestireno
            if handles.xSamples==3
                set(handles.s1,'string', 170);
                set(handles.s2,'string', 82);
            elseif handles.xSamples==2
                set(handles.s1,'string', 170);
                set(handles.s2,'string', 55);
            elseif handles.xSamples==1.5
                set(handles.s1,'string', 170);
                set(handles.s2,'string', 28);
            elseif handles.xSamples==1
                set(handles.s1,'string', 170);
                set(handles.s2,'string', 18);
            else
                set(handles.s1,'string', 'Valor inadecuado');
                set(handles.s2,'string', 'Valor inadecuado');
            end

        end

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function menu_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to menu (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

Appendices E – Catálogos de fabricantes

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

LANA DE VIDRIO



Pura **LANA DE VIDRIO** sin colorantes ni aglutinantes, diámetro de las fibras 5 a 6 micras.

EMPAQUES
En fundas de polietileno.

MEDIDAS
De 2,50m medida estándar.
Pedidos especiales hasta 5m de largo, ancho 65cm.
Espesor: Estándar 1 pulgada y pedidos especiales hasta 4 pulgadas.

TEMPERATURA AL SERVICIO
De 0 a 600 grados centígrados.

DENSIDAD
5 kg/m³ hasta 70 kg/m³.

Figura E- 1. Especificaciones técnicas de la lana de vidrio

Fuente: <http://www.andifibras.com/servicios.html>



TELECINEC S.A.
Tecnología Eléctrica Industrial

Para: Sr. Alexis Calle
Atención: Sr. alexis Calle
Dirección:
Teléfono:
E-mail: alexis_calle@hotmail.es ajcalle@espol.edu.ec

DESCRIPCION

Resistencia tipo tubular $\varnothing 3/8"$ X 224cm. 230V- 2200W.



Figura E- 2. Características de resistencia eléctrica tubular

Fuente: Telecinec S.A. 2017

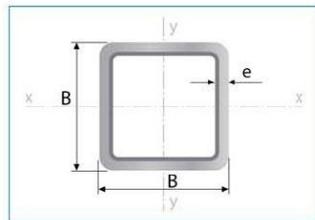
VacuMaster® 1-Stage Pump Specifications

	15115	15310	15510
Voltage	110V / 60 Hz	110V / 60 Hz	110V / 60 Hz
Free Air Displacement	1.5 CFM	3.0 CFM	5.0 CFM
Ultimate Vacuum	115 microns	75 microns	75 microns
Stages	1	1	1
Motor	1/5 HP	1/4 HP	1/2 HP
Intake Ports	1/4 in. flare & 1/2 in. ACME	1/4 in. flare & 1/2 in. ACME	1/4 in. flare & 1/2 in. ACME
Oil Capacity	300 ml (10 oz.)	250 ml (8.5 oz.)	300 ml (10 oz.)
Power Cord Length	6 ft.	6 ft.	6 ft.
Dimensions	286 mm x 124 mm x 228 mm	318 mm x 124 mm x 235 mm	338 mm x 138 mm x 246 mm
Net Weight	6.9 kg	8.2 kg	9.7 kg

Figura E- 3. Características de bomba de vacío de una sola etapa

Fuente: Robinair. 2010

Tubería Estructural Cuadrada



Largo Normal:
6 metros
Recubrimiento:
Negro o Galvanizado
Norma de Calidad:
ASTM A 500 Gr. A, B ó C
Norma de Fabricación:
NTE INEN 2415
Espesores:
Desde 1,50 a 6,00 mm
Observaciones:
Otras dimensiones y largos,
previa consulta

Aplicaciones

- Automotriz y de autopartes: carrocería y remolques.
- Agrogranadera: maquinaria e implementos industriales, agrícolas, avícolas y ganaderos.
- Señalización y vialidad: soportes.
- Aparatos de gimnasia y fitness.
- Construcción: columnas.
- Estructuras: galpones y naves industriales, edificios, soporte de techos.

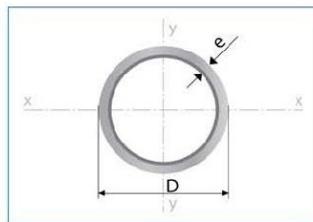


Designaciones	Área	Peso	Propiedades Estáticas			
			Eje x-x = y-y			
B	e	A	P	I	W	i
mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
20	1,40	0,99	0,78	0,56	0,56	0,75
	1,50	1,05	0,83	0,58	0,58	0,78
	1,80	1,23	0,96	0,66	0,66	0,73
	2,00	1,34	1,05	0,70	0,70	0,72
25	1,40	1,27	1,00	1,16	0,93	0,95
	1,50	1,35	1,06	1,22	0,97	0,95
	1,80	1,59	1,25	1,39	1,11	0,94
	2,00	1,74	1,36	1,49	1,19	0,93
30	1,40	1,55	1,22	2,08	1,39	1,16
	1,50	1,65	1,30	2,20	1,47	1,15
	1,80	1,95	1,53	2,53	1,68	1,14
	2,00	2,14	1,68	2,73	1,82	1,13
40	1,40	2,11	1,66	5,18	2,59	1,57
	1,50	2,25	1,77	5,49	2,75	1,56
	1,80	2,67	2,09	6,39	3,19	1,55
	2,00	2,94	2,31	6,95	3,47	1,54
	2,50	3,59	2,82	8,23	4,12	1,51
	3,00	4,21	3,30	9,36	4,68	1,49
	4,00	5,35	4,20	11,18	5,59	1,45
50	1,40	2,67	2,10	10,42	4,17	1,97
	1,50	2,85	2,24	11,07	4,43	1,97
	1,80	3,39	2,66	12,95	5,18	1,96
	2,00	3,74	2,93	14,15	5,66	1,95
	2,50	4,59	3,60	16,96	6,78	1,92
	3,00	5,41	4,25	19,50	7,80	1,90
	4,00	6,95	5,45	23,84	9,54	1,85
60	1,50	3,45	2,71	19,52	6,51	2,36
	1,80	4,11	3,22	22,95	7,65	2,36
	2,00	4,54	3,56	25,15	8,38	2,35
	2,50	5,59	4,39	30,36	10,12	2,33
	3,00	6,61	5,19	35,17	11,72	2,31
	4,00	8,55	6,71	43,65	14,55	2,26
70	1,50	4,05	3,18	31,46	8,99	2,79
	1,80	4,83	3,79	37,09	10,60	2,77
	2,00	5,34	4,19	40,73	11,64	2,76
	2,50	6,59	5,17	49,43	14,12	2,74
	3,00	7,81	6,13	57,56	16,45	2,72
	4,00	10,15	7,97	72,22	20,64	2,67
75	1,50	4,35	3,42	38,92	10,38	2,99
	1,80	5,19	4,07	45,95	12,25	2,98
	2,00	5,74	4,50	50,50	13,47	2,97
	2,50	7,09	5,56	61,40	16,37	2,94
	3,00	8,41	6,60	71,65	19,11	2,92
	4,00	10,95	8,59	90,29	24,08	2,87
90	1,80	6,27	4,22	80,71	17,94	3,56
	2,00	6,94	5,45	88,87	19,75	3,56
	2,50	8,59	6,74	108,57	24,13	3,56
	3,00	10,21	8,01	127,32	28,29	3,53
	4,00	13,35	10,48	162,02	36,01	3,48
100	1,80	6,99	5,48	111,62	22,32	4,00
	2,00	7,74	6,07	123,01	24,60	3,99
	2,50	9,59	7,53	150,65	30,13	3,96
	3,00	11,41	8,96	177,08	35,42	3,94
	4,00	14,95	11,73	226,46	45,29	3,89
	5,00	18,36	14,41	271,36	54,27	3,84
	6,00	21,63	16,98	312,00	62,40	3,80
125	3,00	14,41	11,31	354,53	56,73	4,96
	4,00	18,95	14,87	457,33	73,17	4,91
	5,00	23,36	18,33	552,87	88,46	4,87
	6,00	27,63	21,69	641,41	102,63	4,82
135	3,00	15,61	12,25	449,88	66,65	5,37
	4,00	20,55	16,13	581,80	86,19	5,32
	5,00	25,36	19,90	705,16	104,47	5,27
	6,00	30,03	23,58	820,25	121,52	5,23
150	3,00	17,41	13,67	622,76	83,03	5,96
	4,00	22,95	18,01	807,92	107,72	5,93
	5,00	28,36	22,26	982,37	130,98	5,89
	6,00	33,63	26,40	1146,43	152,86	5,84

Figura E- 4. Especificaciones perfil estructural cuadrado

Fuente: IPAC. 2017.

Tubería Mecánica Redonda



Largo Normal:
6 metros
Recubrimiento:
Negro o Galvanizado
Norma de Calidad:
ASTM A366
Norma de Fabricación:
INEN 2415
Espesores:
Desde 0,60 a 1,50 mm
Observaciones:
Otras dimensiones y largos,
previa consulta

Aplicaciones

- Muebles metálicos en general.
- Plateros de cocina.
- Cerrajería (rejillas, puertas, etc).
- Partes y piezas para productos de línea blanca.
- Tubos para closets.
- Rieles de cortina.
- Ductos para cocinas.
- Fabricación de remolques.
- Tubos de escape para vehículos.

INEN

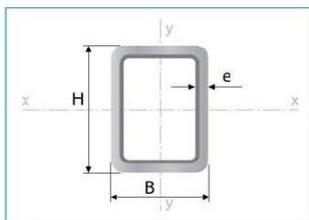
ASTM
INTERNATIONAL
Standards Worldwide

Designaciones		Espesor	Área	Peso	Propiedades Estáticas		
D	D				Momento de inercia	Flexión	Radio de giro
pulg.	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
1/2	12,70	0,60	0,23	0,18	0,04	0,07	0,43
		0,75	0,28	0,22	0,05	0,08	0,42
		0,90	0,33	0,26	0,06	0,09	0,42
		1,10	0,40	0,31	0,07	0,11	0,41
5/8	15,88	0,60	0,29	0,23	0,08	0,11	0,54
		0,75	0,36	0,28	0,10	0,13	0,54
		0,90	0,42	0,33	0,12	0,15	0,53
		1,00	0,47	0,37	0,13	0,16	0,53
		1,10	0,51	0,40	0,14	0,18	0,52
		1,50	0,68	0,53	0,18	0,22	0,51
3/4	19,05	0,60	0,35	0,27	0,15	0,16	0,65
		0,75	0,43	0,34	0,18	0,19	0,65
		0,90	0,51	0,40	0,21	0,22	0,64
		1,00	0,57	0,45	0,23	0,24	0,64
		1,10	0,62	0,49	0,25	0,26	0,64
		1,50	0,83	0,65	0,32	0,34	0,62
7/8	22,23	0,60	0,41	0,32	0,24	0,21	0,77
		0,75	0,51	0,40	0,29	0,26	0,76
		0,90	0,60	0,47	0,34	0,31	0,75
		1,10	0,73	0,57	0,41	0,37	0,75
		1,50	0,98	0,77	0,53	0,47	0,73
1	25,40	0,60	0,47	0,37	0,36	0,28	0,88
		0,75	0,58	0,46	0,44	0,35	0,87
		0,90	0,69	0,54	0,52	0,41	0,87
		1,00	0,77	0,60	0,57	0,45	0,86
		1,10	0,84	0,66	0,62	0,49	0,86
		1,50	1,13	0,88	0,81	0,64	0,85
1 1/4	31,75	0,75	0,73	0,57	0,88	0,55	1,10
		0,90	0,87	0,68	1,04	0,65	1,09
		1,10	1,06	0,83	1,25	0,78	1,08
		1,50	1,43	1,12	1,63	1,03	1,07
1 1/2	38,10	0,90	1,05	0,83	1,82	0,96	1,32
		1,10	1,28	1,00	2,19	1,15	1,31
		1,50	1,72	1,35	2,89	1,52	1,30
1 3/4	44,45	1,00	1,37	1,07	3,22	1,45	1,54
		1,10	1,50	1,18	3,52	1,58	1,53
		1,50	2,02	1,59	4,67	2,10	1,52
1 7/8	47,68	1,00	1,47	1,15	4,00	1,68	1,65
		1,10	1,61	1,26	4,37	1,83	1,65
		1,50	2,18	1,71	5,81	2,44	1,63
2	50,80	1,10	1,72	1,35	5,31	2,09	1,76
		1,50	2,32	1,82	7,06	2,78	1,74

Figura E- 5. Especificaciones perfil estructural redondo

Fuente: IPAC. 2017.

Tubería Mecánica Rectangular



Largo Normal:
6 metros
Recubrimiento:
Negro o Galvanizado
Norma de Calidad:
ASTM A366
Norma de Fabricación:
INEN 2415
Espesores:
Desde 0,75 a 1,50 mm
Observaciones:
Otras dimensiones y largos,
previa consulta

- Aplicaciones
- Muebles metálicos en general.
 - Cerrajería: rejas, puertas, etc.
 - Pasamanos.
 - Cerramientos para viviendas.
 - Fabricación de remolques.
 - Estanterías.
 - Parantes de repisas.



Designaciones	Área	Peso	Propiedades Estáticas							
			Eje x-x			Eje y-y				
B	H	e	A	P	I	W	i	I	W	i
mm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm
12	25	0,75	0,52	0,41	0,43	0,34	0,90	0,13	0,22	0,50
		0,90	0,61	0,49	0,53	0,42	0,89	0,16	0,27	0,49
		1,10	0,73	0,59	0,59	0,48	0,88	0,18	0,30	0,49
20	30	0,75	0,71	0,56	0,89	0,59	1,12	0,48	0,48	0,82
		0,90	0,85	0,67	1,10	0,73	1,11	0,59	0,59	0,81
		1,10	1,02	0,81	1,24	0,83	1,10	0,66	0,66	0,81
20	40	0,75	0,86	0,68	1,80	0,90	1,45	0,62	0,62	0,85
		0,90	1,03	0,81	2,23	1,11	1,44	0,76	0,76	0,84
		1,10	1,24	0,98	2,53	1,26	1,43	0,86	0,86	0,83
		1,50	1,65	1,31	3,10	1,60	1,37	1,06	1,06	0,82
25	50	1,00	1,43	1,13	4,69	1,88	1,81	1,60	0,64	1,06
		1,10	1,57	1,24	5,10	2,04	1,80	1,74	0,70	1,05
		1,50	2,10	1,67	6,39	2,56	1,74	2,19	1,75	1,02
30	50	1,10	1,68	1,33	5,75	2,30	1,85	2,62	1,75	1,25
		1,50	2,25	1,79	7,27	2,91	1,80	3,32	2,21	1,21

Figura E- 6. Especificaciones tubería mecánica rectangular

Fuente: IPAC. 2017.

Planchas

- Laminada en caliente
- Laminada en frío



Plancha laminada en caliente

Recubrimiento:
Negro
Norma de Fabricación:
NTE INEN 115, ASTM A 6
Norma de Calidad:
ASTM A 570 Gr 36 / ASTM A 36 / ASTM A 283 Gr C /
ASTM A 588 Gr A / ASTM A 131 Gr A / ASTM A 516
Gr 70
Observaciones:
Dimensiones y largos especiales, previa consulta

Ancho	Largo	Espesor	Peso Aprox.
mm	mm	mm	kg.
1220	2440	1,50	35,05
1220	2440	2,00	46,74
1220	2440	3,00	70,10
1220	2440	4,00	93,47
1220	2440	5,00	116,84
1220	2440	6,00	140,21
1220	2440	8,00	186,94
1220	2440	9,00	210,31
1220	2440	10,00	233,68
1220	2440	12,00	280,41

› Aplicaciones

- Conformación de estructuras en general con elementos de alma llena (flejes).
- Fabricación de tanques.
- Estructuras de puentes.
- Estructuras de barcos.
- Camisas de pilotes.
- Encofrados.
- Placas.
- Contención de tierra.
- Plataformas.
- Calderos.
- Tubería de grandes diámetros.

Plancha laminada en frío

Recubrimiento:
Negro
Norma de Fabricación:
NTE INEN 115
Norma de Calidad:
ASTM A 36 / JIS G 3141 SPCC - SD /
SAE 1010
Observaciones:
Dimensiones y largos especiales, previa consulta

Ancho	Largo	Espesor	Peso Aprox.	Calidad
mm	mm	mm	kg.	
1000	2000	0,70	10,99	Embutición
1000	2000	0,90	14,13	
1000	2000	1,10	17,27	
1000	2000	1,40	21,98	
1220	2440	0,40	9,35	Comercial
1220	2440	0,45	10,52	
1220	2440	0,50	11,68	
1220	2440	0,60	14,02	
1220	2440	0,70	16,36	
1220	2440	0,75	17,52	
1220	2440	0,90	21,03	
1220	2440	1,10	25,70	
1220	2440	1,40	32,72	
1220	2440	2,00	46,74	

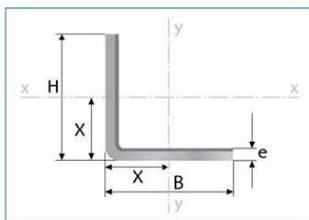
› Aplicaciones

- Muebles metálicos en general.
- Puertas metálicas.
- Carpintería metálica.
- Tanque para almacenamiento de aceite.
- Tanques de exportación de frutas.
- Baldes para camionetas.
- Partes y piezas metálicas (abrazaderas, de línea blanca, etc).
- Rótulos.
- Señalización de tránsito.
- Cajas fúnebres.
- Autopartes.

Figura E- 7. Especificaciones plancha laminada en frío

Fuente: IPAC. 2017.

Perfiles Estructurales Ángulos



Largo Normal:
6 metros
Recubrimiento:
Negro o Galvanizado
Calidad de Acero:
ASTM A 36 / ASTM A 572 Gr. 50
Norma de Fabricación:
NTE INEN 1623
Espesores:
Desde 1,50 a 6,00 mm
Observaciones:
Otras dimensiones y largos,
previa consulta

- › Aplicaciones
- Conformación de elementos estructurales (cerchas).
 - Torres.
 - Estanterías.
 - Cerrajería en general (ventanas, puertas, camas).
 - Vitrinas.
 - Cerramientos.
 - Vallas publicitarias.
 - Chasis de camiones.
 - Remolques.

INEN



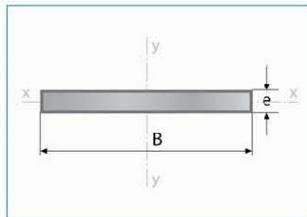
Designaciones	Esp.	Peso		Propiedades Estáticas							
				Eje x-x			Eje y-y			Distancia de eje y-y a superficie	
				Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro	Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro		
H	B	e	P	P	I	W	i	I	W	i	X=Y
mm	mm	mm	kg/m	kg/6m	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm
20	20	1,50	0,44	2,61	0,21	0,15	0,47	0,21	0,15	0,47	0,54
		2,00	0,58	3,46	0,28	0,20	0,62	0,28	0,20	0,62	0,59
		3,00	0,83	4,96	0,38	0,28	0,60	0,38	0,28	0,60	0,64
25	25	1,50	0,55	3,32	0,42	0,24	0,59	0,42	0,24	0,59	0,67
		2,00	0,73	4,38	0,56	0,32	0,73	0,56	0,32	0,73	0,72
		3,00	1,06	6,36	0,79	0,45	0,75	0,79	0,45	0,75	0,77
30	30	1,50	0,67	4,03	0,75	0,35	0,71	0,75	0,35	0,71	0,79
		2,00	0,89	5,34	1,00	0,46	0,94	1,00	0,46	0,94	0,84
		3,00	1,30	7,78	1,41	0,67	0,92	1,41	0,67	0,92	0,89
40	40	1,50	0,91	5,44	1,83	0,63	0,95	1,83	0,63	0,95	1,04
		2,00	1,21	7,23	2,44	0,84	1,25	2,44	0,84	1,25	1,09
		3,00	1,77	10,61	3,50	1,22	1,25	3,50	1,22	1,25	1,14
		4,00	2,31	13,83	4,46	1,58	1,23	4,46	1,58	1,23	1,19
		5,00	2,82	16,90	5,31	1,92	1,22	5,31	1,92	1,22	1,24
50	50	1,50	1,14	6,85	3,65	1,00	1,19	3,65	1,00	1,19	1,29
		2,00	1,52	9,11	4,86	1,33	1,59	4,86	1,33	1,59	1,34
		3,00	2,24	13,43	7,03	1,95	1,57	7,03	1,95	1,57	1,39
		4,00	2,93	17,60	9,04	2,54	1,55	9,04	2,54	1,55	1,44
		5,00	3,60	21,61	10,88	3,10	1,54	10,88	3,10	1,54	1,49
75	75	2,00	2,36	14,13	24,02	4,42	1,77	24,02	4,42	1,77	2,01
		4,00	4,71	28,26	32,03	5,89	2,35	32,03	5,89	2,35	2,06
		5,00	5,57	33,42	39,08	7,25	2,35	39,08	7,25	2,35	2,11
		6,00	7,07	42,39	45,76	8,57	2,33	45,76	8,57	2,33	2,16
100	100	2,00	3,14	18,84	58,35	7,95	2,38	58,35	7,95	2,38	2,52
		4,00	6,28	37,68	77,80	10,60	3,17	77,80	10,60	3,17	2,57
		5,00	7,53	45,18	95,47	13,13	3,16	95,47	13,13	3,16	2,62
		6,00	9,42	58,52	113,00	15,60	3,14	113,00	15,60	3,14	2,67

X, Y= Distancia entre el eje x-x; y-y a la superficie exterior del perfil

Figura E- 8. Especificaciones perfil estructural ángulo

Fuente: IPAC. 2017.

Productos Laminados Pletina



Largo normal:
6 metros
Recubrimiento:
Negro
Espesores:
Desde 3,00 a 12,00 mm
Calidad de acero:
DIN 17100 / ST 37-2 / ASTM A-36
Norma de fabricación:
INEN 2222 / ISO 1035
Observaciones:
Otras dimensiones y largos previa
consulta.

Aplicaciones

- Somier camas.
- Cerrajería en general (puertas, ventanas, rejas).
- Estructuras en general.
- Muebles metálicos.
- Paquete de resortes (Sistemas de suspensión).



Dimensiones	Espesor	Peso
B	e	P
Pulg.	mm	kg/8m
1/2 x 1/8	3,00	1,70
1/2 x 3/16	4,00	2,26
1/2 x 1/4	6,00	3,39
3/4 x 1/8	3,00	2,68
3/4 x 3/16	4,00	3,58
3/4 x 1/4	6,00	5,37
1 x 1/8	3,00	3,53
1 x 3/16	4,00	4,71
1 x 1/4	6,00	7,07
1 x 3/8	9,50	10,59
1 x 1/2	12,00	14,13
1 1/4 x 1/8	3,00	4,24
1 1/4 x 3/16	4,00	5,65
1 1/4 x 1/4	6,00	8,47
1 1/4 x 3/8	9,50	12,71
1 1/2 x 1/8	3,00	5,37
1 1/2 x 3/16	4,00	7,16
1 1/2 x 1/4	6,00	10,74
1 1/2 x 3/8	8,00	16,11
1 1/2 x 1/2	12,00	21,48
2 x 1/8	3,00	7,07
2 x 3/16	4,00	9,50
2 x 1/4	6,00	14,13
2 x 3/8	9,50	21,20
2 x 1/2	12,00	28,26
2 1/2 x 1/4	6,00	18,37
2 1/2 x 3/8	9,50	27,55
2 1/2 x 1/4	6,00	18,37
3 x 1/4	6,00	21,20
3 x 3/8	9,50	31,80
4 x 1/4	6,00	28,26
4 x 3/8	9,50	42,40
4 x 1/2	12,00	56,52

Figura E- 9. Especificaciones pletina

Fuente: IPAC. 2017.

Perforaciones Redondas

Perforación Standart: D= Diámetro de la perforación / C= Distancia entre centros

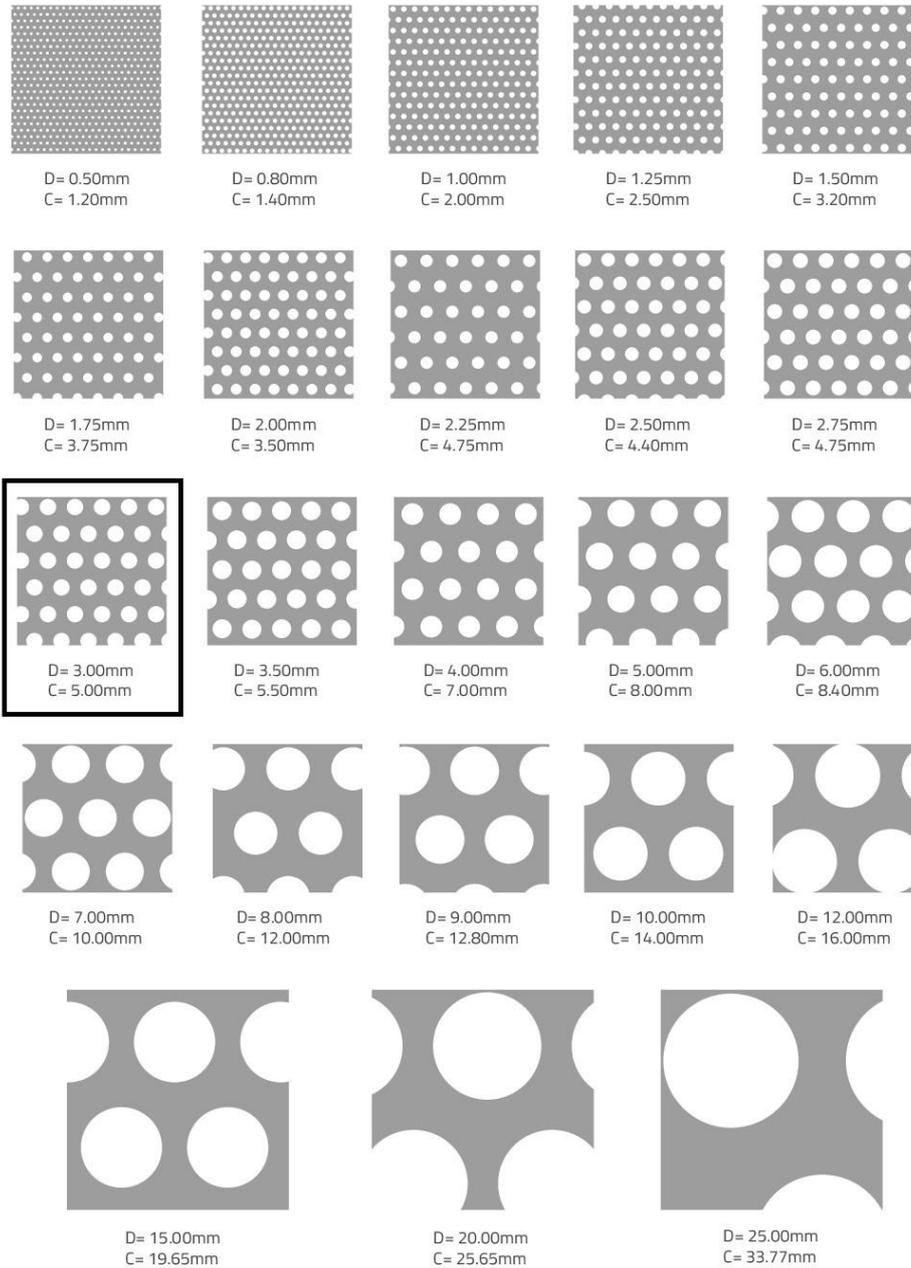
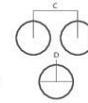


Figura E- 10. Especificaciones plancha perforada

Fuente: IPAC. 2017.

Apéndice F – Guía de laboratorio

PRACTICA: ELABORACION DE PIEZAS MEDIANTE TERMOFORMADO

OBJETIVO. - La técnica de Termoformado se basa en el estiramiento de láminas termoplásticas mediante el calentamiento y aplicación de fuerzas para su posterior formado. En la presente practica se usa una máquina de Termoformado, por lo que es importante identificar el principio de funcionamiento de la máquina y parámetros a medir. Se pretende que al finalizar esta práctica el estudiante cumpla con los siguientes objetivos:

- Conocer los principios y técnicas de Termoformado.
- Utilizar distintos tipos de materiales termoplásticos con diferente espesor.
- Identificar rangos de temperatura ideales para el formado de las piezas.
- Realizar una pieza mediante la técnica del Termoformado.

TEORIA: El Termoformado es un proceso de manufactura de plásticos, donde láminas de material termoplástico se transforma en un objeto moldeado mediante el estiramiento de dicho material.

Empieza con el calentamiento de láminas termoplásticas hasta un rango de temperaturas según el material utilizado (Tabla 1.), seguido se deforma mediante la aplicación de fuerzas externas que obligan a la lámina a hacer contacto con un molde, por último, el material moldeado se enfría debido al contacto con el molde a temperatura ambiente.

Polímero	Temperatura de Termoformado (°C)
ABS / PVC	160-200
PET	145-175
HDPE	160-205
LDPE	160-180
PS	145-180
PP	170-185
PES	275-370

En la figura 1, se observa el proceso con calentamiento mediante resistencias eléctricas y moldeo utilizando succión de vacío para el formado de la pieza. Dicho procedimiento es el utilizado en la máquina de Termoformado para la presente práctica, tomando en cuenta que no es la única manera de realizar el Termoformado.

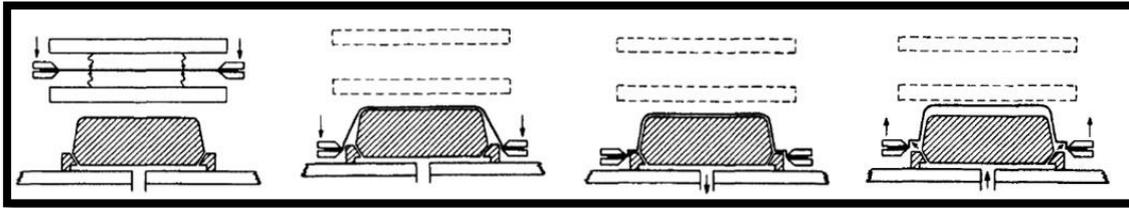


Figura1. Termoformado mediante resistencia eléctrica y sistema de vacío

Este proceso implica el movimiento de materia hacia otras regiones al estirar el material, lo que se describe en variación del espesor a lo largo de la pieza. Para evitar este inconveniente existen relaciones de estiramiento entre la pieza formada y dimensión de la lámina sin deformar.

$$AR = \frac{A_p}{A_s} \text{ (Ecuacion 1.)}$$

Donde.

AR . Relación de Área.

A_p . Area superficial de la pieza.

A_s . Área superficial de la lámina.

Para aplicaciones de Termoformado la relación de áreas máxima que se puede utilizar es de 3:1, con dichos datos se limita la altura máxima del molde.

$$h_0 = AR h_f \text{ (Ecuación 2.)}$$

Donde.

h_0 . Espesor inicial de la lámina.

h_f . Espesor final de la lámina.

La ecuación 2 sirve para predecir el espesor crítico de la pieza formada, esto brinda información acerca de la calidad de la pieza final.

La presente practica se realizará con láminas termoplásticas con dimensiones 300x300 mm, de material:

- Polietileno de alta densidad (HDPE)
- Poliestireno (PS)

Procedimiento experimental

1. Abrir el programa Matlab, establecer la ruta de la carpeta donde se encuentra el código de la interfaz gráfica llamada 'Example1.m', ejecutar el código.
2. Activar la interfaz gráfica mediante un clic, seleccionar el material y espesor de la lámina, como se observa en la figura 2.

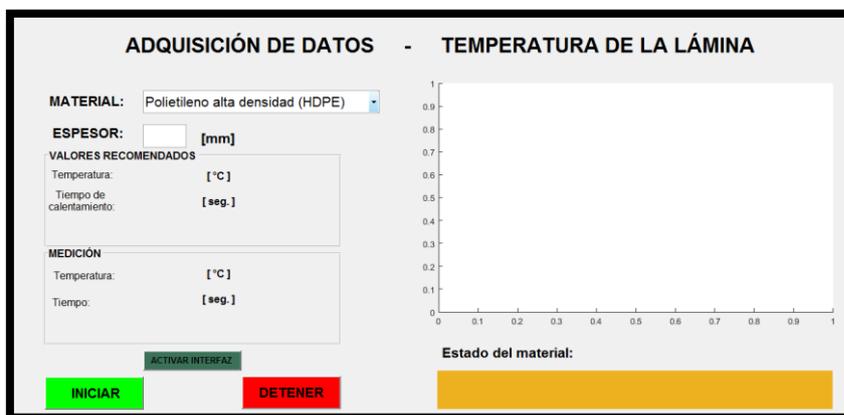


Figura2. Interfaz gráfica del programa

3. Colocar el molde seleccionado sobre la plataforma de vacío.
4. Prender el horno de resistencias eléctricas mediante el control analógico, ajustar la temperatura del horno en 450 °C, esperar 3 minutos hasta que llegue a la temperatura requerida.
5. Abrir el marco de sujeción y colocar la lámina sobre la lana de vidrio de la superficie. La lamina debe estar centrada en el marco, posteriormente cerrar y asegurar el marco de sujeción.
6. Mover el horno hacia afuera de tal manera que se coloque sobre el marco de sujeción. Este paso debe ser con mucha cautela ya que el horno está a temperaturas elevadas.
7. En la interfaz gráfica dar clic en Iniciar para empezar la recolección de datos de temperatura en el tiempo.
8. Observar la temperatura medida y los mensajes de estado del material.
9. El programa indica cuando se llega al rango de temperaturas para la deformación. Al llegar a dicha temperatura con mucho cuidado se coloca el horno en su posición inicial.
10. Inmediatamente se empuja la palanca situada en el costado derecho, el marco de sujeción baja hacia la cama de vacío y activa la bomba por un lapso de 8 segundos.
11. Se levanta el marco de sujeción a su posición inicial, y se abre para retirar el objeto deformado.
12. Experimentar con distintos materiales y distintos espesores.
13. Realizar los cálculos correspondientes.



Cálculos representativos

Calcular la altura máxima permitida para el molde con Relación de áreas (AR): 3, según las recomendaciones del procedimiento de Termoformado mediante la ecuación 1.

$$AR = \frac{A_P}{A_S} \text{ (Ecuacion 1.)}$$

Calcular el espesor mínimo en el molde mediante la ecuación 2.

$$h_0 = AR h_f \text{ (Ecuacion 2.)}$$



HOJA DE EVALUACION

PRACTICA DE TERMOFORMADO

FECHA: _____

CALIFICACION: _____

ALUMNO: _____

1. Tabule los datos de la práctica:

Material	
Espesor [mm]	
Largo de la lámina [mm]	
Ancho de la lámina [mm]	
Altura del molde [mm]	
Rango de Temperaturas de Termoformado [mm]	

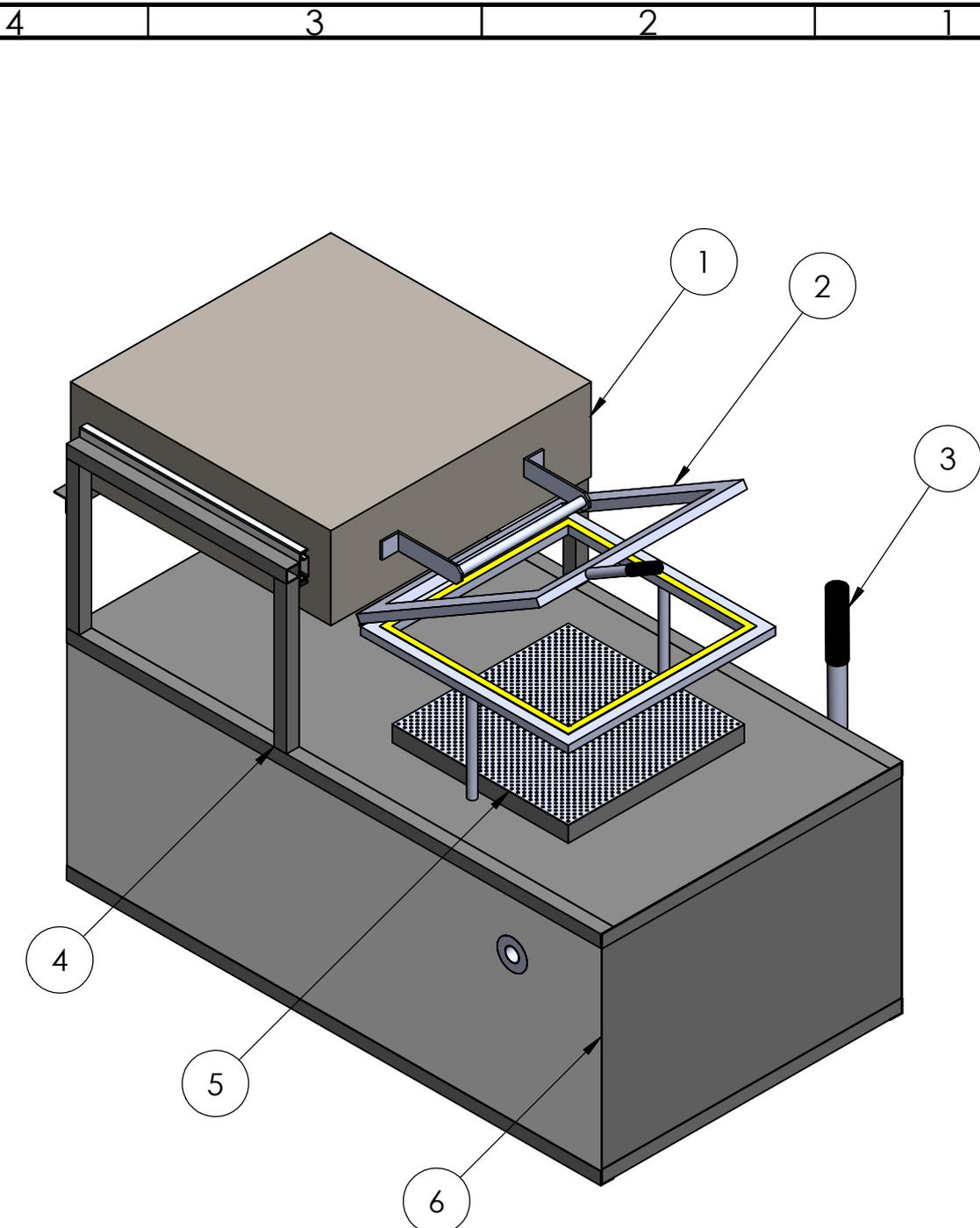
2. Dadas las dimensiones de la lámina calcular la altura máxima permitida para el molde con la ecuación 1. Tomando en cuenta la Relación de áreas (AR): 3, según las recomendaciones del procedimiento de Termoformado.

Calcular el espesor mínimo en el molde mediante la ecuación 2.

3. PREGUNTAS EVALUATIVAS

- ¿Cuáles son los tipos de Termoformado? Identifique el utilizado en el presente experimento.
- Mencione las características principales de los productos del Termoformado.
- Para un proceso de Termoformado se va a utilizar una lámina de Poliestireno (PS) de 3000x3000 mm con un espesor de 3 mm para elaboración de contenedores de comida. ¿Cuánta es la altura máxima que se puede utilizar en el molde?
- ¿Cómo cambia la estructura molecular de los termoplásticos según la temperatura de la lámina?
- ¿Qué ocurre si se deja a la lámina expuesta a calentamiento durante mucho tiempo?

Apéndice G – Planos



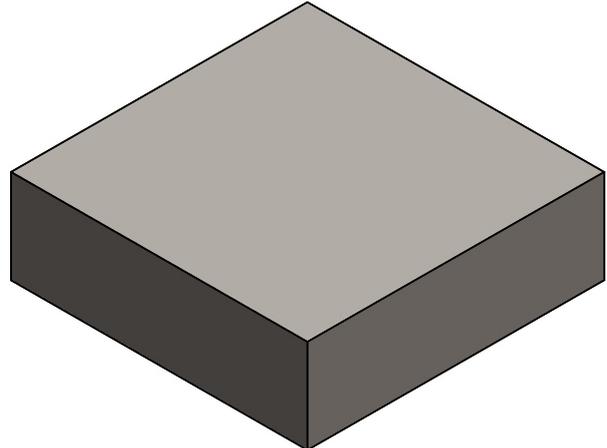
6	5	Carcasa de la máquina
5	1	Mesa de vacío
4	1	Estructura de la máquina
3	1	Mecanismo de movimiento
2	1	Marco de sujeción
1	1	Horno
Marca	Cantidad	Designación

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL	Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
NOMBRE		FIRMA	FECHA		Título:	
DIBUJ.	Alexis Calle C.		09/02/2017	MATERIAL:	Partes de la máquina de termoformado	A4
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.			PESO:		ESCALA:1:7.5
APROB.	Ph.D. Andres Rigail				HOJA 1 DE 17	

4 3 2 1

F

F



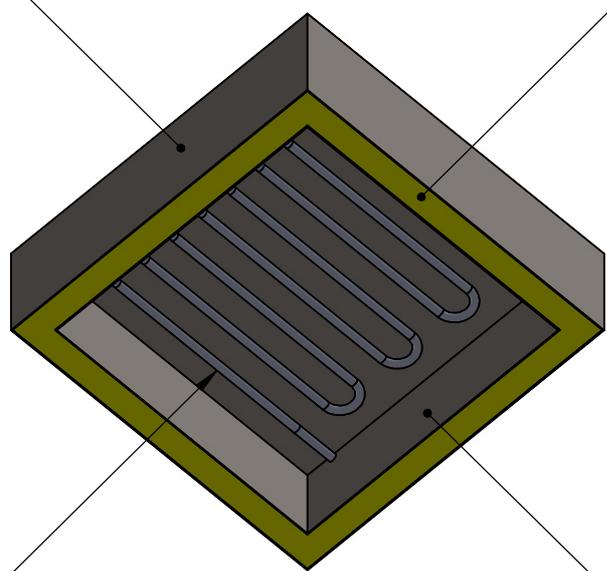
E

E



D

D



C

C



B

B

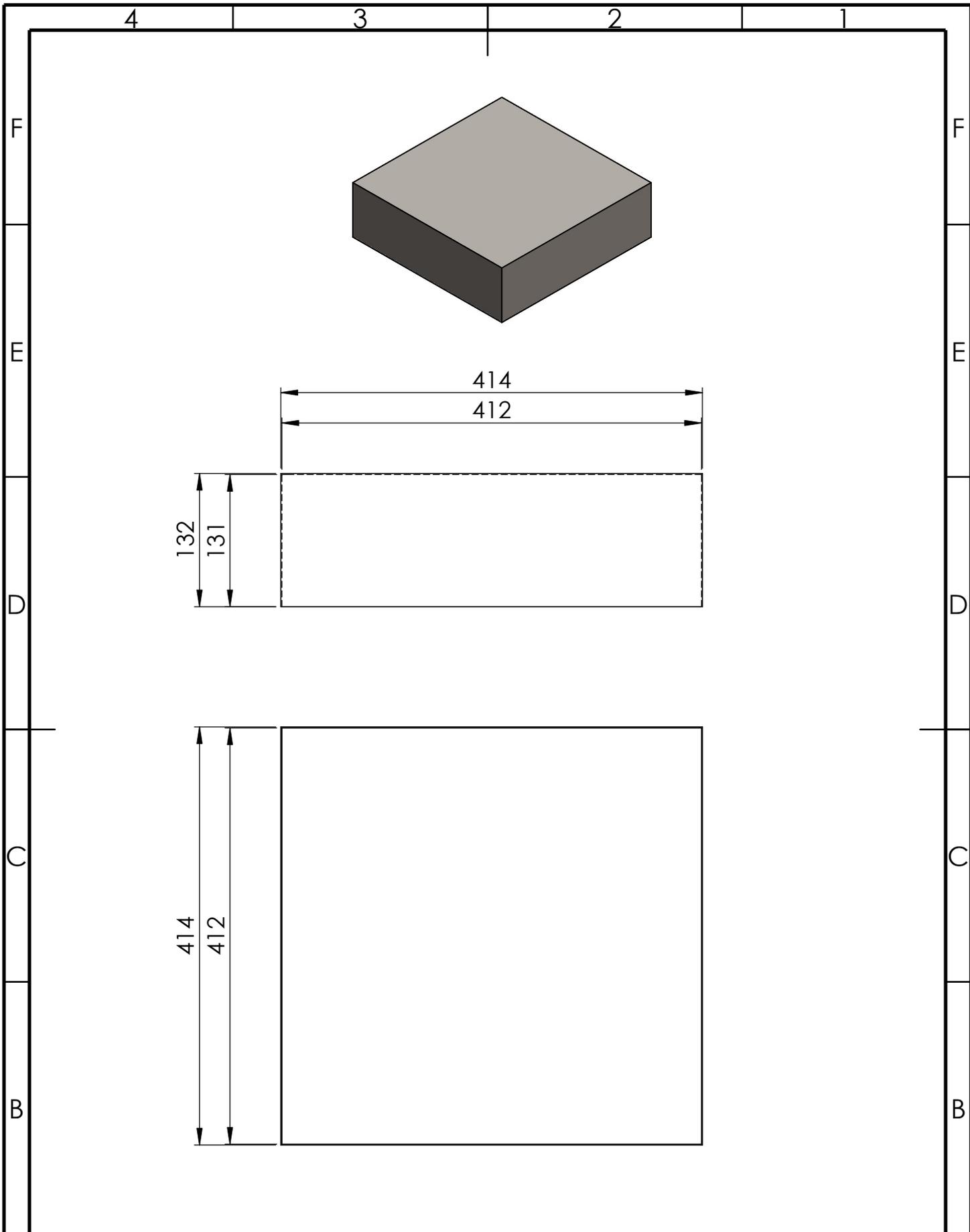
4	1	Resistencia tubular electrica 3/8"
3	1	Pared interior
2	1	Lana de vidrio (Aislante)
1	1	Pared exterior
Marca	Cantidad	Designación

A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL	Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
NOMBRE		FIRMA	FECHA		Título:	
DIBUJ.	Alexis Calle C.		09/02/2017	MATERIAL:	Horno	A4
	Marcos Sánchez M.					
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.					ESCALA: 1:7.5
APROB.	Ph.D. Andres Rigail			PESO:	HOJA 2 DE 17	

4 3 2 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL		Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
A	NOMBRE		FIRMA	FECHA	MATERIAL: ASTM A36	Título:	
	DIBUJ.			09/02/2017		Horno - Pared exterior	
	VERIF.					ESCALA: 1:5	
	APROB.					HOJA 3 DE 17	
	Alexis Calle C.					A4	
	Marcos Sánchez M.						
	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.						
	Ph.D. Andres Rigail						

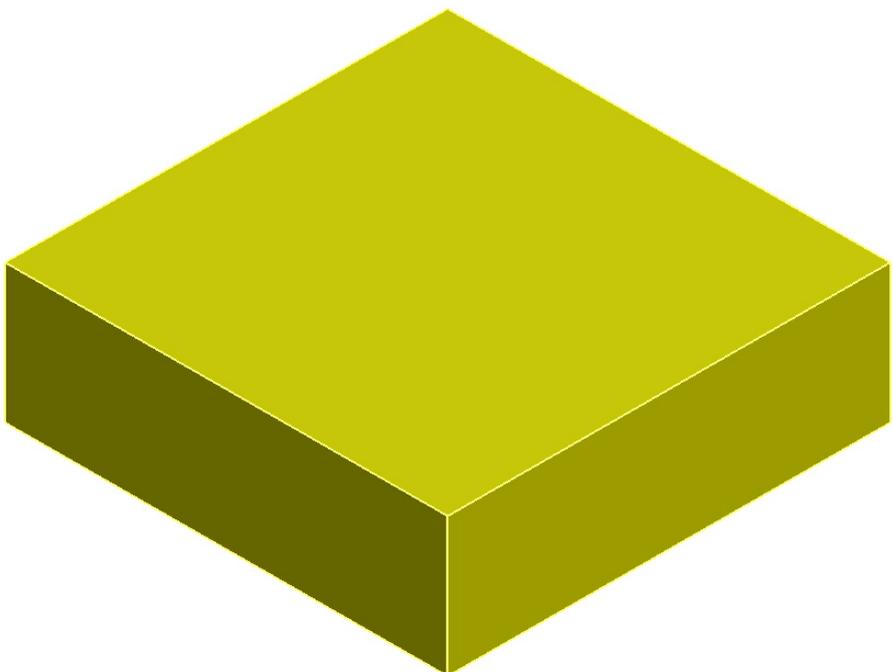
4 3 2 1

F

F

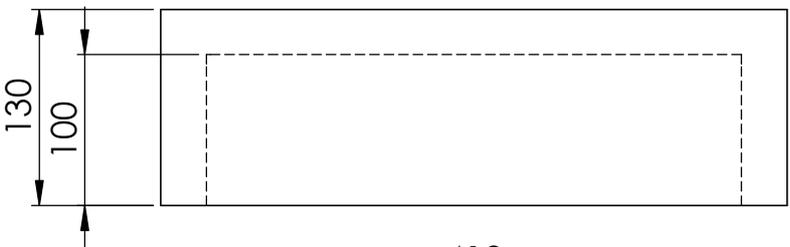
E

E



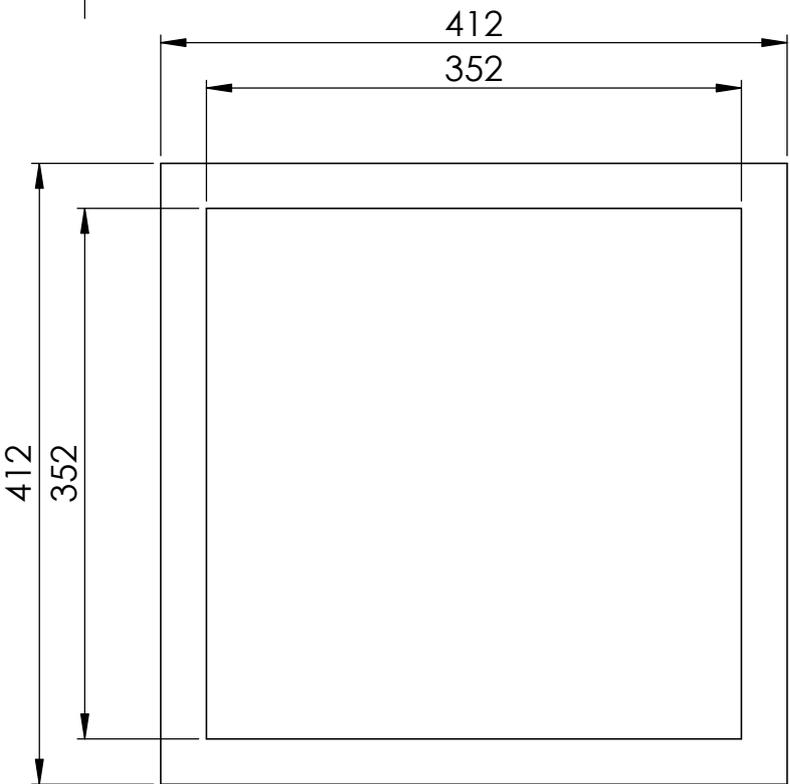
D

D



C

C



B

B

A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

ESPOL

Proyecto:
Diseño de una máquina de
termoformado para laboratorio

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Alexis Calle C.		09/02/2017
	Marcos Sánchez M.		
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.		
APROB.	Ph.D. Andres Rigail		

MATERIAL:
Lana de vidrio

Título:
Horno - Aislante

A4
ESCALA: 1:5

PESO:

HOJA 4 DE 17

4 3 2 1

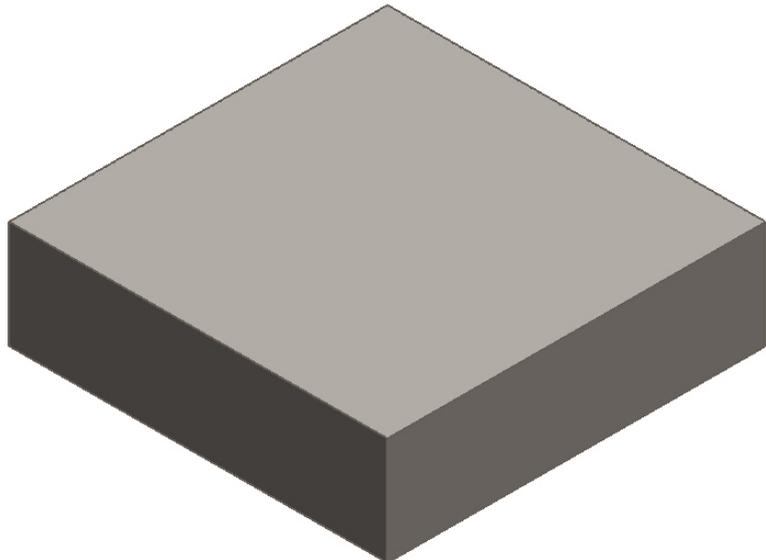
4 3 2 1

F

F

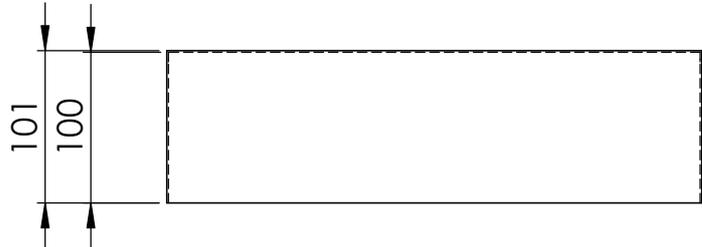
E

E



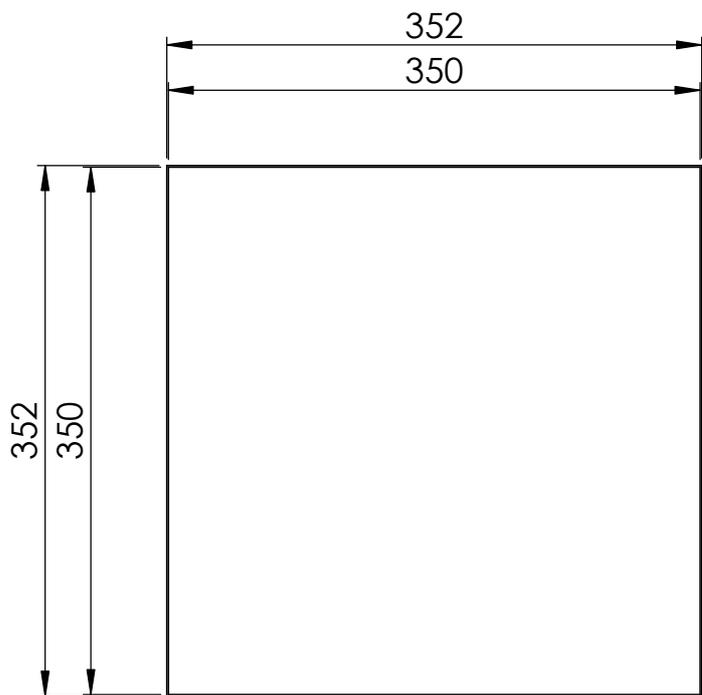
D

D



C

C



B

B

A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

ESPOL

Proyecto:
Diseño de una máquina de
termoformado para laboratorio

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Alexis Calle C.		09/02/2017
	Marcos Sánchez M.		
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.		
APROB.	Ph.D. Andres Rigail		

MATERIAL:
ASTM A36

Título:
Horno - Pared interior

A4

ESCALA:1:5

PESO:

HOJA 5 DE 17

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

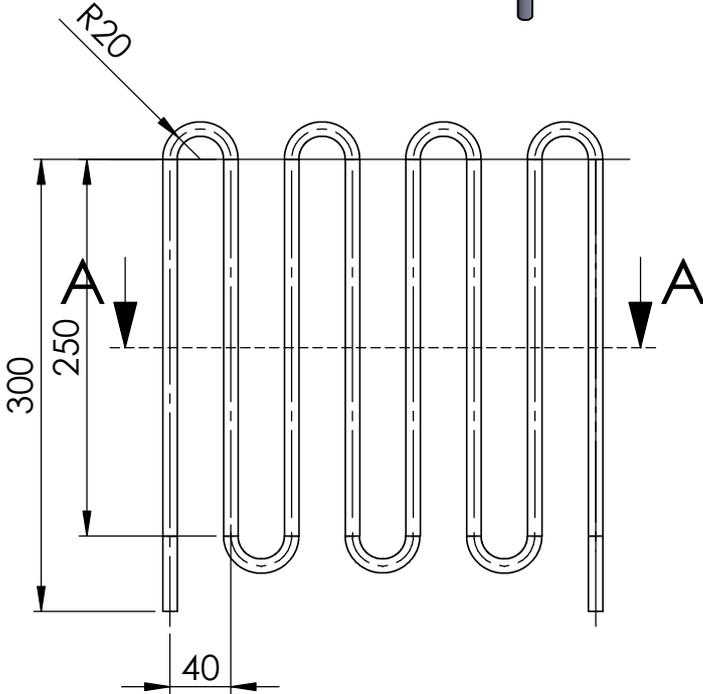
D

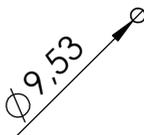
C

C

B

B




SECCIÓN A-A
 ESCALA 1 : 5

A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

ESPOL

Proyecto:
Diseño de una máquina de
termoformado para laboratorio

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Alexis Calle C.		09/02/2017
	Marcos Sánchez M.		
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.		
APROB.	Ph.D. Andres Rigail		

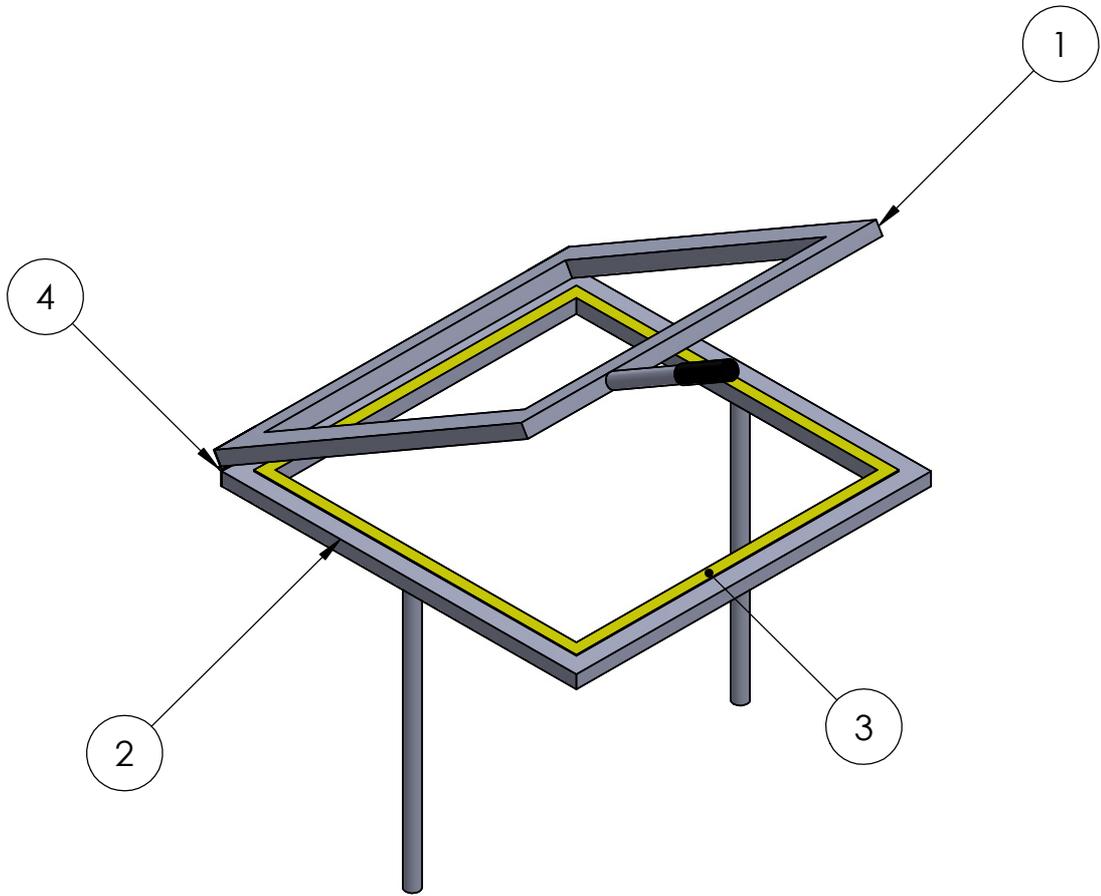
MATERIAL:
Resistencia
Kanthal

Título:
Horno - Resistencia

A4
ESCALA:1:5

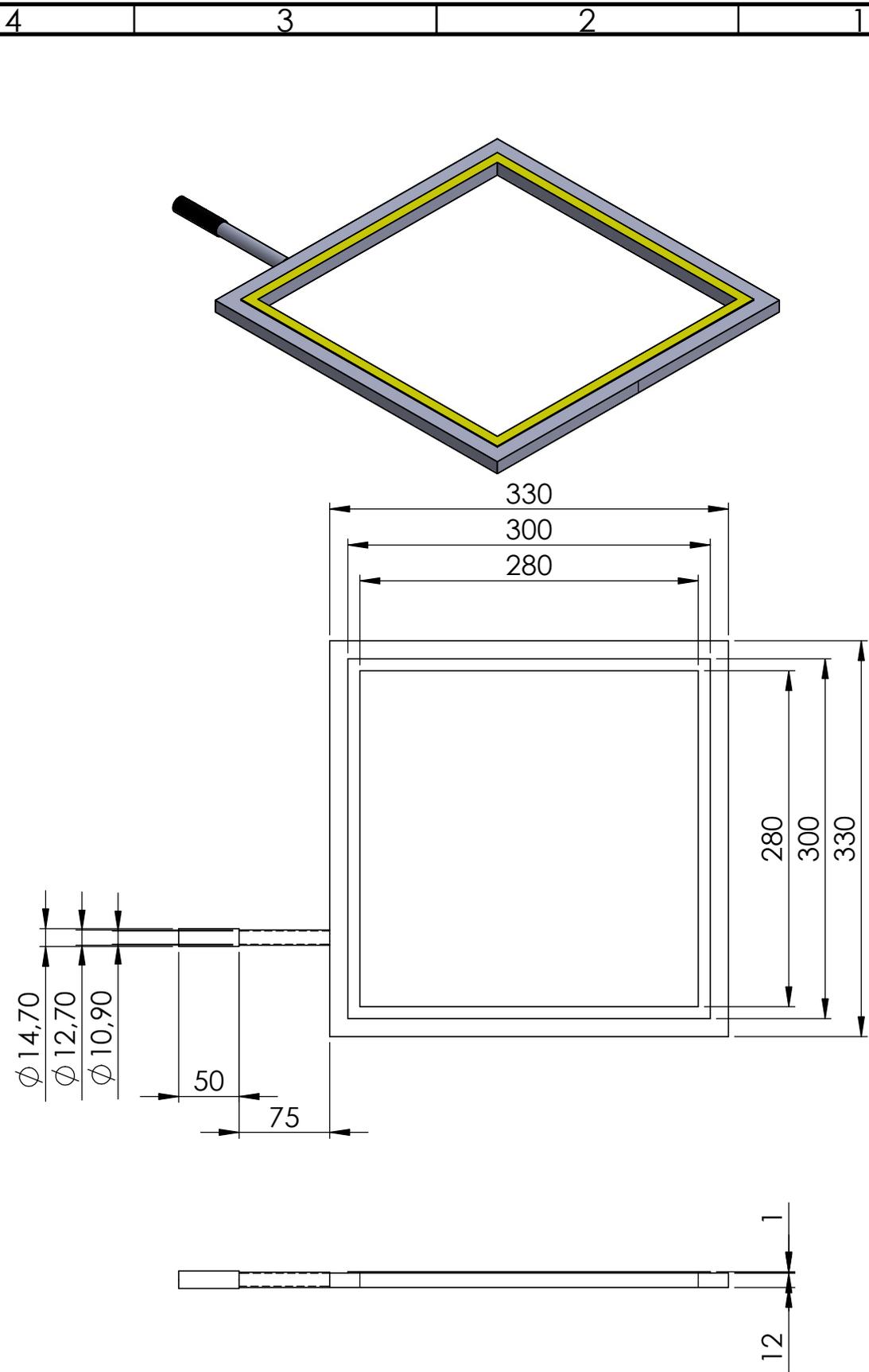
PESO: HOJA 6 DE 17

4 3 2 1

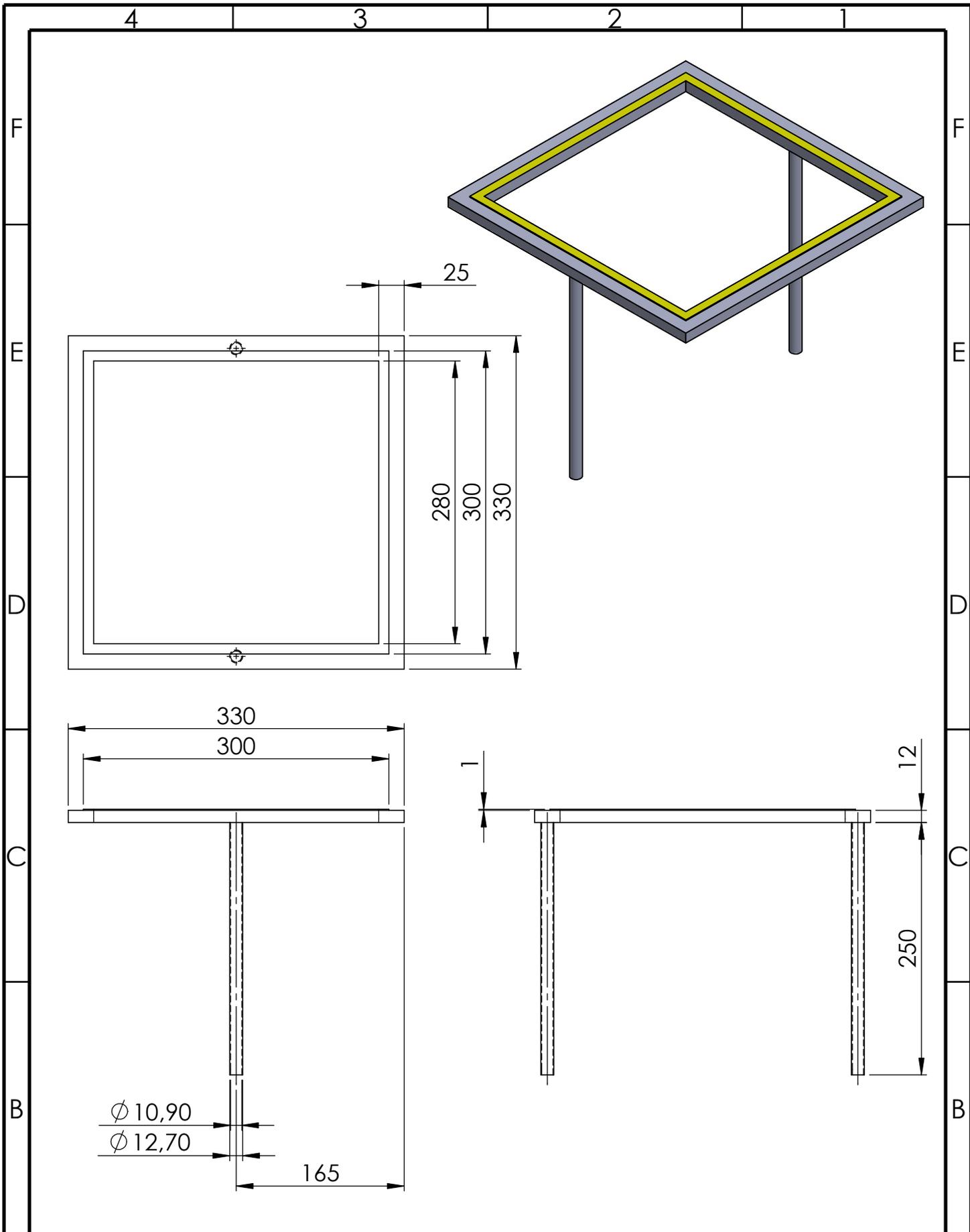


4	2	Bisagra
3	2	Lana de vidrio
2	1	Marco inferior
1	1	Marco superior
Marca	Cantidad	Designación

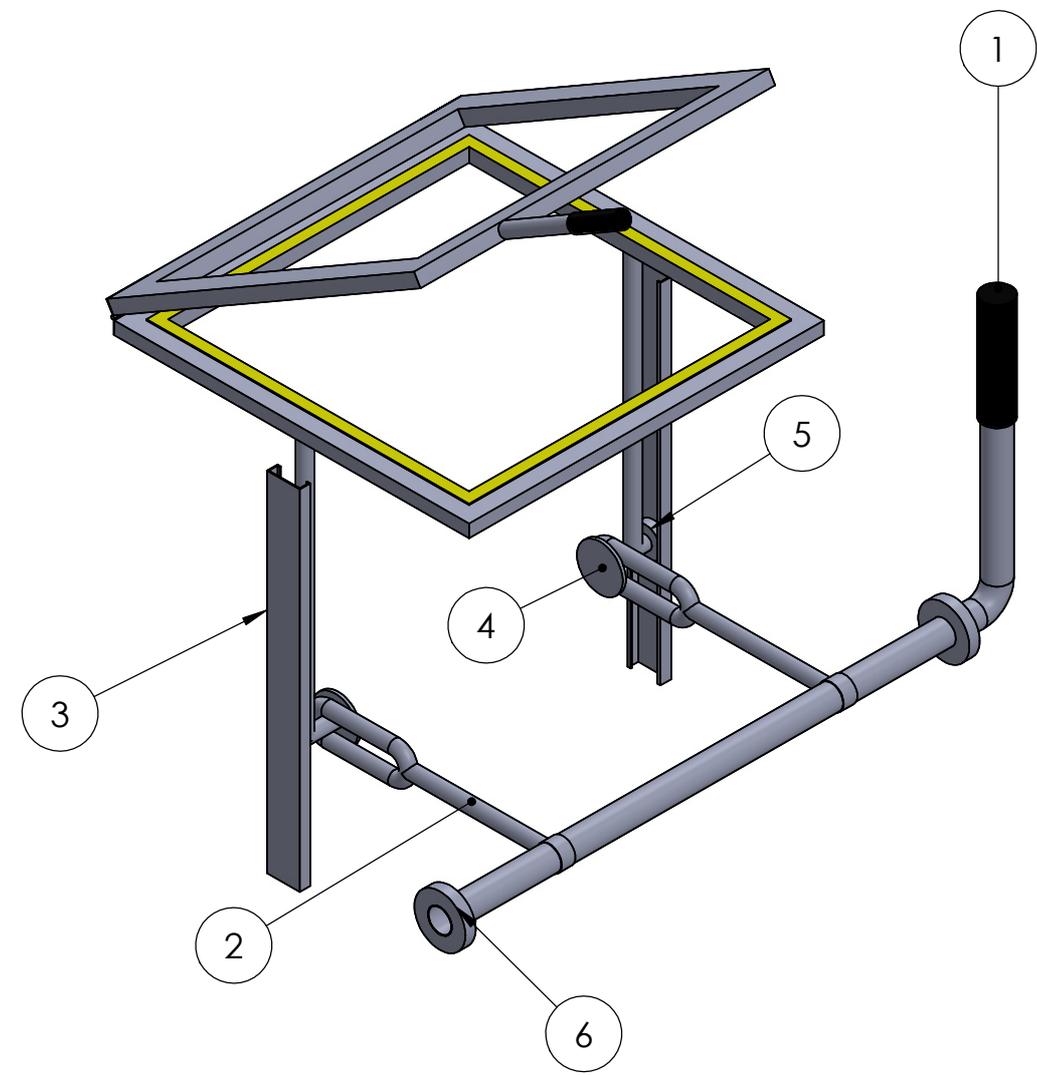
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL	Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
NOMBRE		FIRMA	FECHA		Título:	
DIBUJ.	Alexis Calle C.		09/02/2017	MATERIAL:	Marco de sujeción	A4
	Marcos Sánchez M.					ESCALA:1:5
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.			PESO:	HOJA 7 DE 17	
APROB.	Ph.D. Andres Rigail					



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL	Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
DIBUJ.		FECHA			Título:	
NOMBRE		FIRMA		MATERIAL:		A4
Ing. Jorge Marcial, M.Sc.				09/02/2017		ESCALA: 1:5
VERIF.		APROB.		PESO:		
Ph.D. Andres Rigail				HOJA 8 DE 17		

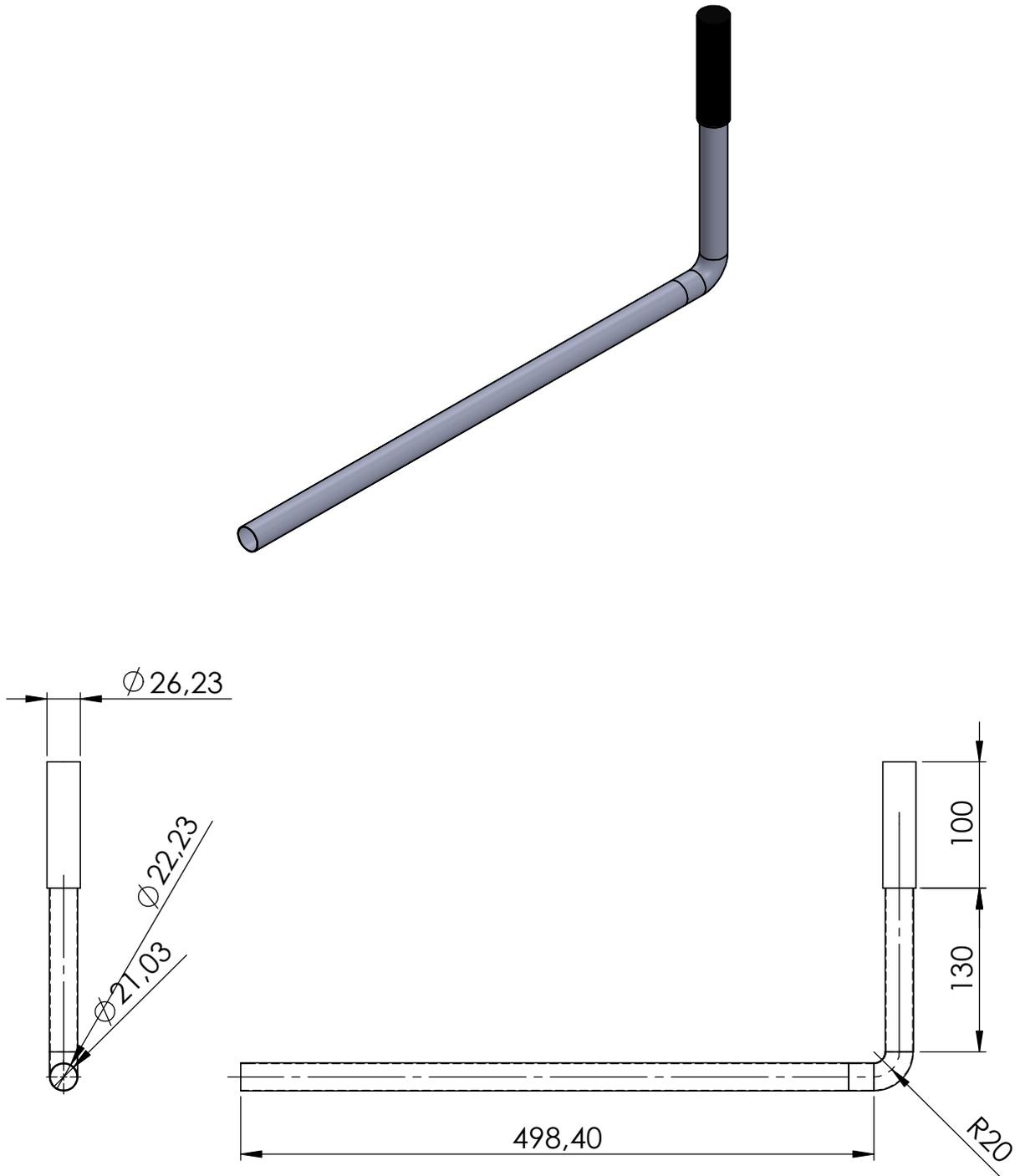


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL		Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
A	NOMBRE		FIRMA	FECHA	MATERIAL:	Título:	
	Alexis Calle C.			09/02/2017		Marco inferior	
	Marcos Sánchez M.					A4	
	VERIF. Ing. Jorge Marcial, M.Sc.					ESCALA: 1:5	
APROB. Ph.D. Andres Rigail				PESO:	HOJA 9 DE 17		

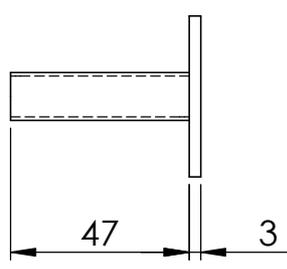
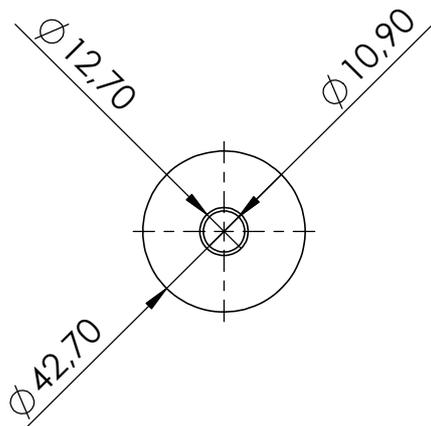
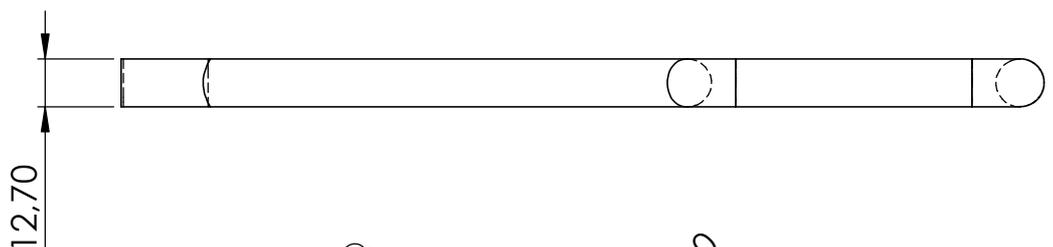
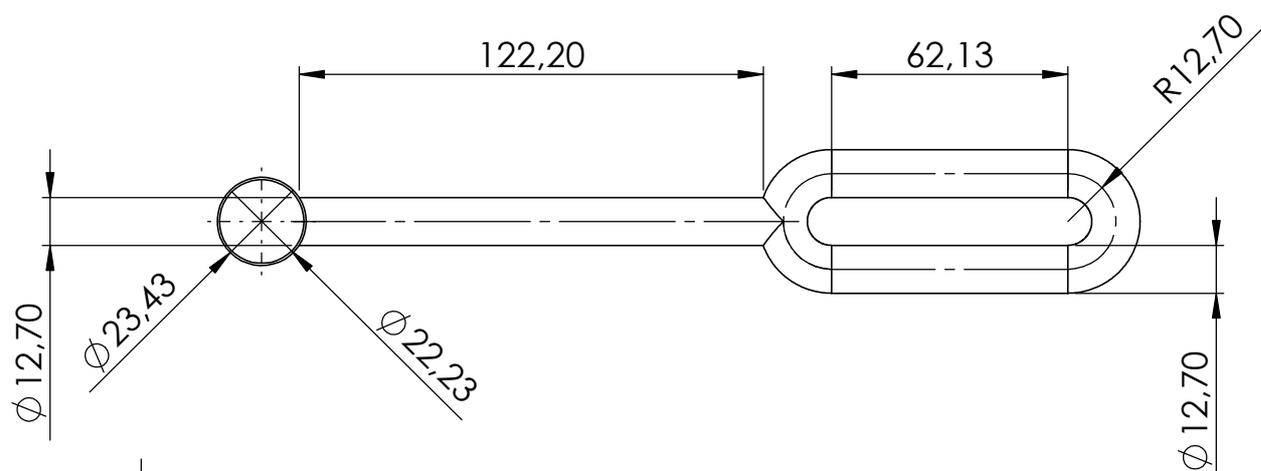


6	2	Rodamiento para la palanca
5	2	Rodamiento para el pin
4	2	Pin
3	2	Riel (Perfil C)
2	2	Corredera
1	1	Palanca
Marca	Cantidad	Designación

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL	Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
NOMBRE		FIRMA			Título:	
DIBUJ.	Alexis Calle C.			MATERIAL:	Mecanismo de movimiento	A4
	Marcos Sánchez M.					09/02/2017
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.			PESO:	HOJA 10 DE 17	
APROB.	Ph.D. Andres Rigail					



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL		Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio		
NOMBRE		FIRMA				FECHA		Título: Mecanismo de movimiento Palanca
DIBUJ.	Alexis Calle C.			09/02/2017		MATERIAL: ASTM A36		A4
	Marcos Sánchez M.							ESCALA:1:5
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.					HOJA 11 DE 17		
APROB.	Ph.D. Andres Rigail							



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL	Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
NOMBRE Alexis Calle C.		FIRMA			Título: Mecanismo de movimiento Corredera & Pin	
DIBUJ. Marcos Sánchez M.		FECHA 09/02/2017		MATERIAL: ASTM A36		A4
VERIF. Ing. Jorge Marcial, M.Sc.				PESO:		ESCALA:1:5
APROB. Ph.D. Andres Rigail				HOJA 12 DE 17		

4 3 2 1

F

E

D

C

B

F

E

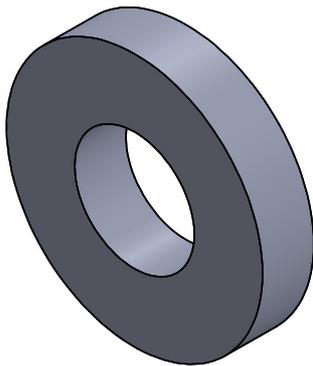
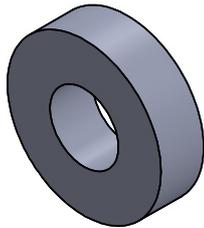
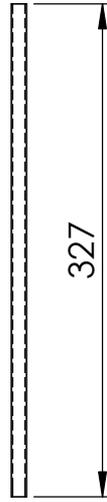
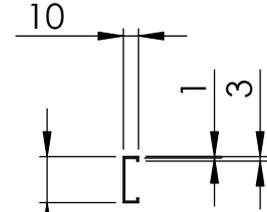
D

C

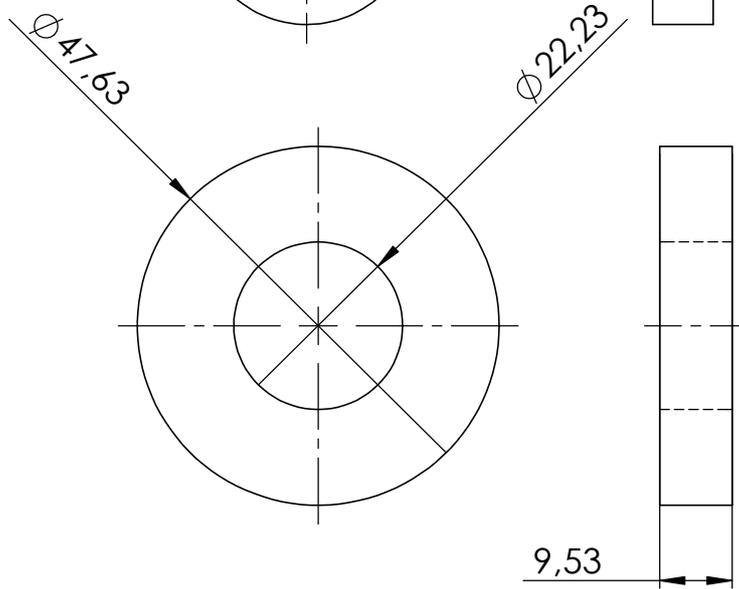
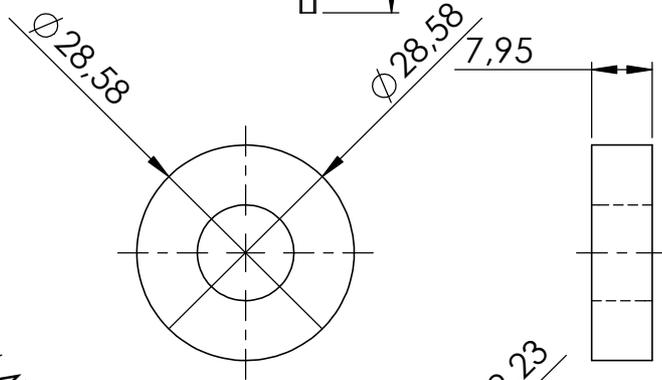
B



Riel - Escala 1:5



Rodamientos - Escala 1:1

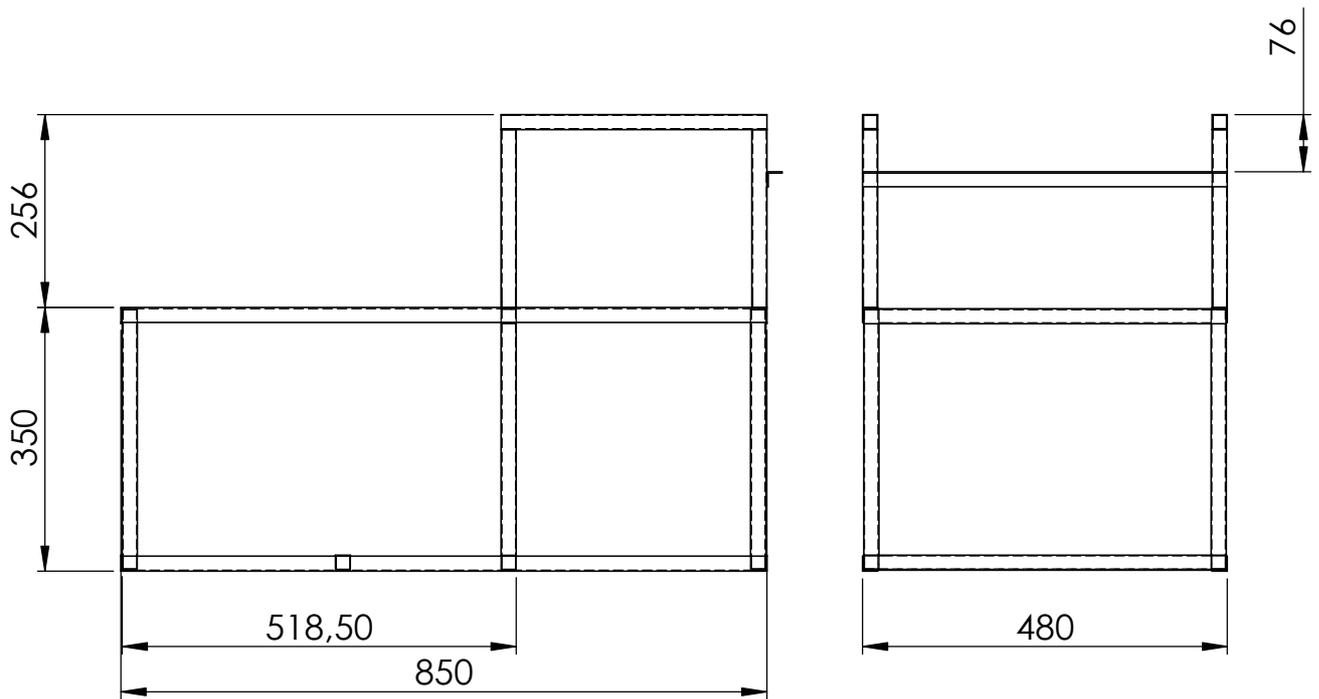
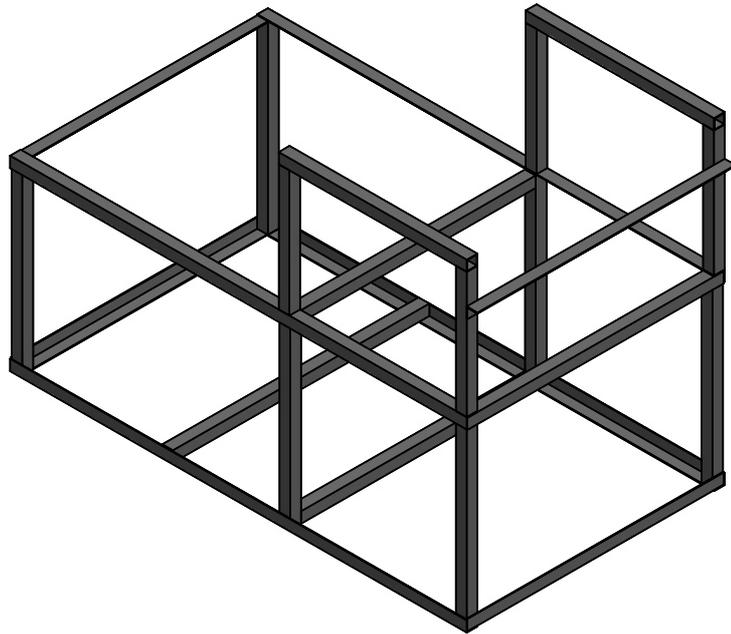


A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL	Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
NOMBRE		FIRMA	FECHA		MATERIAL:	
DIBUJ.	Alexis Calle C.		09/02/2017			A4
	Marcos Sánchez M.					ESCALA: Indicada
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.					
APROB.	Ph.D. Andres Rigail			PESO:		HOJA 13 DE 17

4 3 2 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL	Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
NOMBRE		FIRMA	FECHA		MATERIAL:	Título:
DIBUJ.	Alexis Calle C.		09/02/2017	ASTM A36	Estructura de la máquina	ESCALA: 1:10
	Marcos Sánchez M.					
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.					
APROB.	Ph.D. Andres Rigail			PESO:	HOJA 14 DE 17	

4 3 2 1

F

F

E

E

D

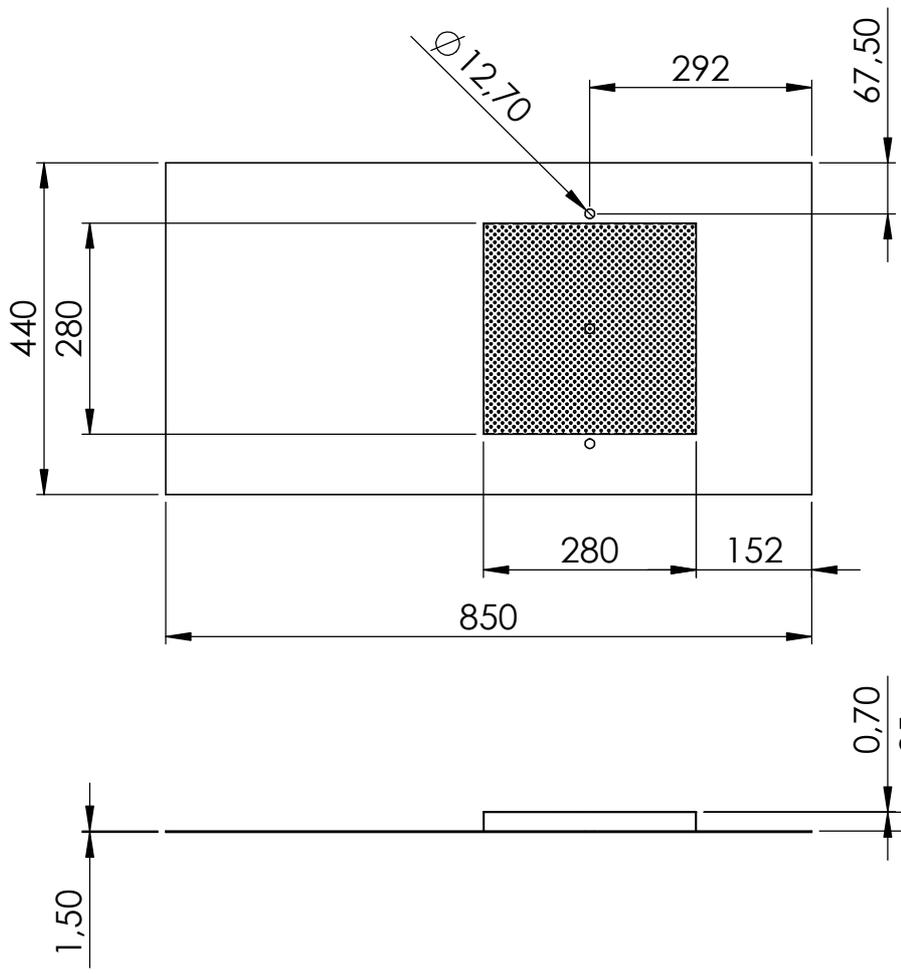
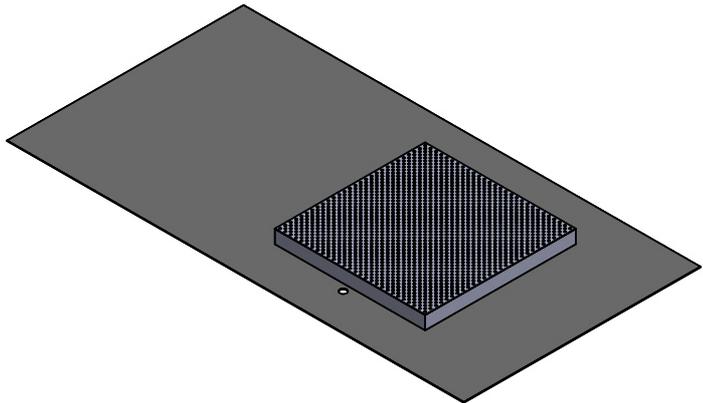
D

C

C

B

B



A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL		Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL: ASTM A36	Título: Mesa de vacío		A4
	Alexis Calle C.		09/02/2017				ESCALA:10
	Marcos Sánchez M.						
	VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.					
APROB.	Ph.D. Andres Rigail			PESO:	HOJA 15 DE 17		

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

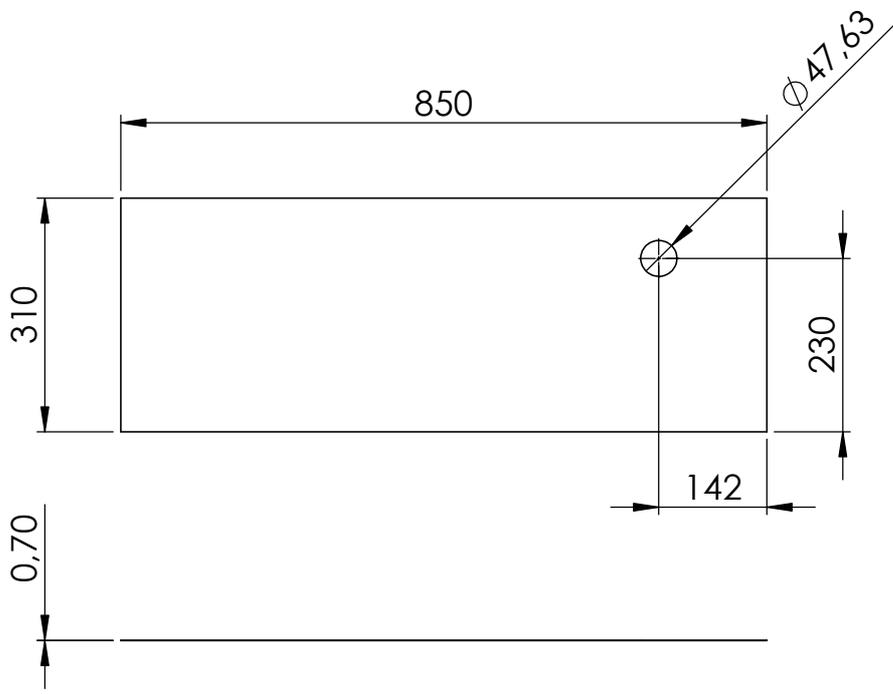
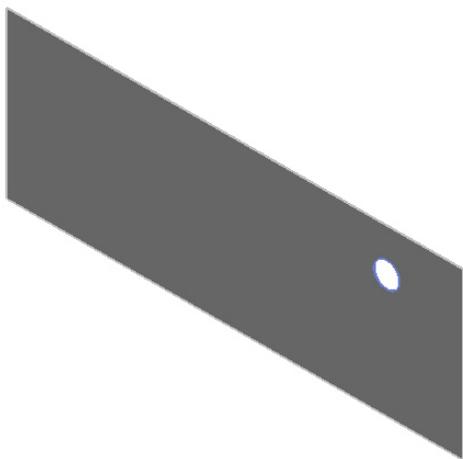
D

C

C

B

B



A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		ESPOL		Proyecto: Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL: ASTM A36	Título: Plancha frontal	A4	
	Alexis Calle C.		09/02/2017			ESCALA:1:10	
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.						
APROB.	Ph.D. Andres Rigail			PESO:		HOJA 16 DE 17	

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

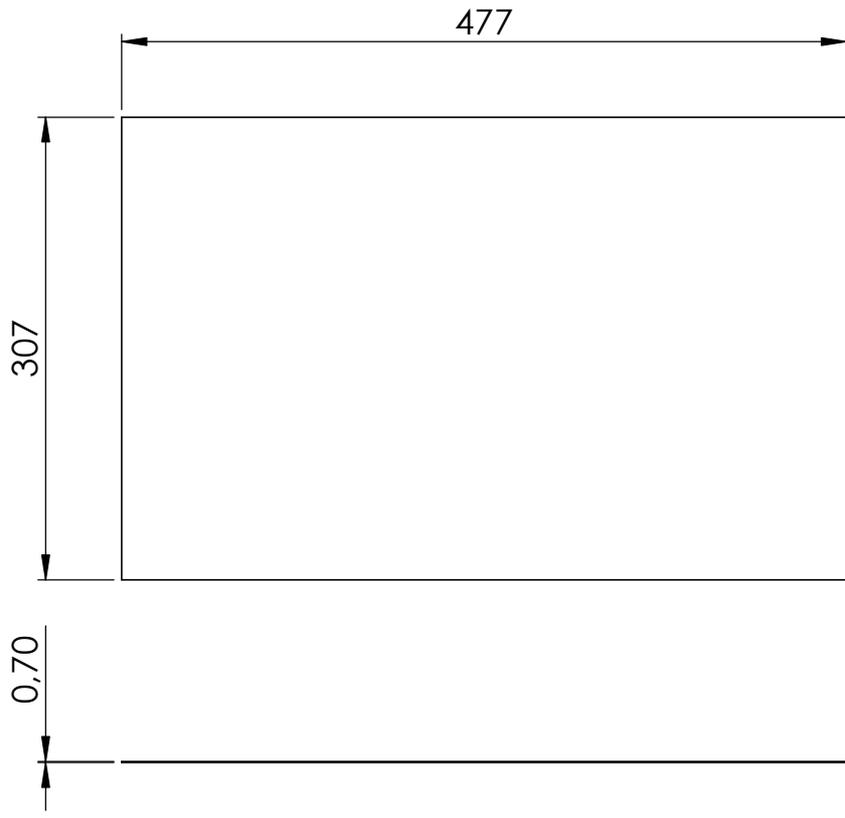
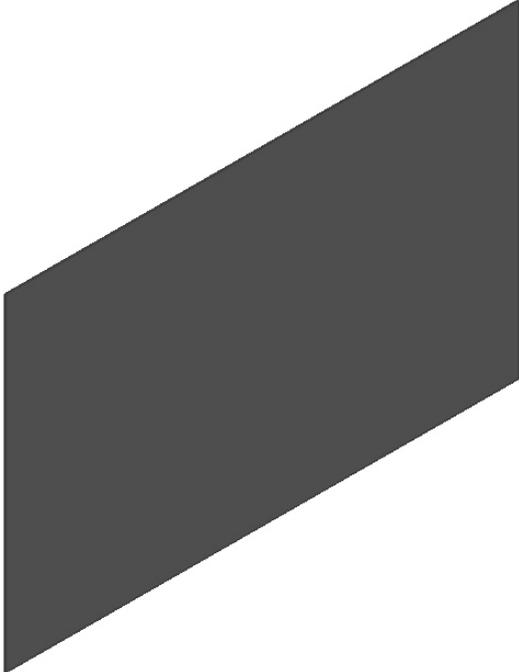
D

C

C

B

B



A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

ESPOL

Proyecto:
Diseño de una máquina de
termoformado para laboratorio

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Alexis Calle C.		09/02/2017
	Marcos Sánchez M.		
VERIF.	Ing. Jorge Marcial, M.Sc.		
APROB.	Ph.D. Andres Rigail		

MATERIAL:
ASTM A36

Título:
Plancha lateral

A4

ESCALA:1:5

PESO: HOJA 17 DE 17

4 3 2 1