



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE MECÁNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN ESTÁTICA DE UNA MÁQUINA
TERMOFORMADORA AL VACÍO PARA EL LABORATORIO DE
PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE MATERIALES DE LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

WILSON MAURICIO CUEVA AGUILAR

TUTOR:

LUIS CHRISTIAN JUIÑA QUILACHAMÍN

Quito-Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Wilson Mauricio Cueva Aguilar con documento de identificación N° 1716088909; manifiesto que: Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 7 de Mayo del 2023

Atentamente,



Wilson Mauricio Cueva Aguilar

1716088909

**CERTIFICADO DE CESION DE DERECHOS DE AUTOR DE TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**

Yo, Wilson Mauricio Cueva Aguilar con documento de identificación N.º 1716088909, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: "Diseño y Simulación de una máquina termoformadora al vacío para el laboratorio de materiales de la Universidad Politécnica Salesiana", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Mecánicos , en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 7 de Mayo del 2023

Atentamente,



Wilson Mauricio Cueva Aguilar

1716088909

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO

DE TITULACIÓN

Yo, Luis Christian Juiña Quilachamín con documento de identificación N° 1713704508, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA MÁQUINA TERMOFORMADORA AL VACÍO PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA CAMPUS SUR, realizado por Wilson Mauricio Cueva Aguilar con documento de identificación N.-1716088909, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 7 de Mayo del 2023

Atentamente,



Ing. Luis Christian Juiña Quilachamín, Msc

1713704508

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Wilson Cueva y Lorena Aguilar por haberme apoyado en toda mi carrera universitaria, a mi hermano Nicolás Cueva ejemplos dignos de admirar por su constancia y perseverancia, a mis amigos y amiga Rebeca por su compañía a lo largo de todo el camino universitario por oírme y aconsejarme, a todos los ingenieros que me ayudaron para toda la formación académica principalmente al Ing. Luis Christian Juiña Quilachamín el cual ha sido guía para nuestra propuesta de investigación

Wilson Mauricio Cueva Aguilar.

.

Índice de contenido

AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	1
PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN	2
OBJETIVOS	3
OBJETIVO GENERAL:	3
OBJETIVO ESPECÍFICOS:	3
METODOLOGÍA	4
CAPÍTULO I	5
1.1. Origen de los Polímeros.....	5
1.2. Características Polímeros.....	6
1.2.1. <i>PET</i> :	6
1.2.2. <i>PVC</i> :.....	6
1.3. Tipos de polímeros.....	6
1.3.1. <i>Según su origen</i>	6
1.3.2. <i>Según su estructura</i>	7
1.3.3. <i>Según su comportamiento térmico</i>	7
1.3.4. <i>Según la unión de sus monómeros</i>	7
1.4. Ventajas y Desventajas	7
1.4.1. <i>PET</i> :	7

1.4.2.	<i>PVC:</i>	8
1.5.	Aplicaciones de los polímeros	8
1.6.	Temperaturas de Polímeros para el termoformado	9
1.7.	Técnicas de termoformado.....	10
1.7.1.	<i>Termoformado al vacío</i>	10
1.7.2.	<i>Termoformado a presión</i>	10
1.7.3.	<i>Termoformado mecánico</i>	11
1.8.	Moldes para termoformado.....	11
1.8.1.	<i>Moldes de Madera</i>	11
1.8.2.	<i>Moldes de Escayola</i>	11
1.8.3.	<i>Moldes de Aluminio</i>	11
1.8.4.	<i>Moldes de Acero</i>	11
1.9.	Selección de Alternativas.....	12
1.9.1.	<i>Sistema de control</i>	12
1.9.2.	<i>Sistema de calentamiento de la lámina</i>	13
1.9.3.	<i>Materiales del Sistema mecánico:</i>	14
1.9.4.	<i>Sistema de formado</i>	15
1.9.5.	<i>Sistema de desplazamiento de la lámina</i>	16
CAPITULO II		17
1.10.	DISEÑO MECÁNICO	17
1.10.1.	<i>Matriz de decisión</i>	17
1.10.2.	<i>Esquema General:</i>	17
1.10.3.	<i>Análisis de reacciones en vigas</i>	18
1.10.4.	<i>Momento máximo Áreas:</i>	21
1.10.5.	<i>Esfuerzos</i>	25

1.10.6.	<i>Von Mises:</i>	26
1.10.7.	<i>Factor de seguridad:</i>	27
1.10.8.	<i>Deflexión máxima:</i>	28
1.10.9.	<i>Cálculo de la relación de esbeltez según la geometría:</i>	28
1.10.10.	<i>Radio:</i>	29
1.10.11.	<i>Longitud efectiva:</i>	29
1.10.12.	<i>Relación de esbeltez:</i>	30
1.10.13.	<i>Esfuerzo a compresión:</i>	31
1.10.14.	<i>Presión crítica:</i>	31
1.10.15.	<i>Esfuerzo crítico:</i>	31
1.10.16.	<i>Von Mises:</i>	32
1.10.17.	<i>Factor de seguridad:</i>	33
1.10.18.	<i>Análisis de la soldadura:</i>	34
1.10.19.	<i>Vista lateral:</i>	34
1.10.20.	<i>Propiedades flexionantes de la soldadura:</i>	35
1.10.21.	<i>Área de la garganta:</i>	35
1.10.22.	<i>Cortante directo:</i>	35
1.10.23.	<i>Cortante por flexión:</i>	35
1.11.	DISEÑO TÉRMICO:	38
1.11.1.	<i>Parámetros a tomar en cuenta:</i>	38
1.11.2.	<i>Matriz de decisión para aislante del horno</i>	40
1.11.3.	<i>Coefficiente de convección:</i>	41
1.11.4.	<i>Calor por convección:</i>	43
1.11.5.	<i>Temperatura de la resistencia</i>	44
1.11.6.	<i>Coefficiente de convección:</i>	46

1.11.7.	<i>Calor paredes del horno</i>	48
1.11.8.	<i>Potencia de la resistencia eléctrica</i>	51
1.11.9.	<i>Tiempo de termoformado</i>	52
1.11.10.	<i>Tiempo de succión:</i>	52
1.12.	DISEÑO NEUMÁTICO:	53
1.12.1.	<i>Selección de Bomba de vacío</i>	54
1.12.2.	<i>Sacamos volumen de la mesa de vacío</i>	55
1.12.3.	<i>Volumen de la tolva</i>	55
1.12.4.	<i>Volumen de cámara para objetos recubrir con termoformado</i>	56
1.12.5.	<i>Volumen total</i>	56
1.12.6.	<i>Flujo volumétrico requerido</i>	56
1.12.7.	<i>Cálculo de velocidad perdidas por presión en tuberías</i>	57
1.12.8.	<i>Perdidas por fricción en tuberías</i>	57
1.12.9.	<i>Caída de presión</i>	59
1.12.10.	<i>Perdidas de carga total</i>	60
1.12.11.	<i>Altura de la bomba</i>	61
1.12.12.	<i>Potencia Bomba</i>	62
1.13.	DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO:	63
1.13.1.	<i>Elementos sistema de control:</i>	65
1.14.	Condiciones de Borde	67
1.15.	Análisis de resultados:	68
1.15.1.	<i>Resultados diseño y simulación</i>	68
1.16.	SIMULACIONES:	70
1.16.1.	<i>Simulación mecánica:</i>	70
1.16.2.	<i>Simulación térmica:</i>	74

1.16.3. Simulación Neumática:.....	76
1.16.4. Simulación Eléctrica:.....	77
1.16.1. Comparativa y análisis margen de error:	81
1.17. Análisis de Costos.....	82
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	85

Índice de figuras

Figura 1. <i>Estructura del polietileno</i>	6
Figura 2. <i>Termoformado al vacío</i>	10
Figura 3. <i>Termoformado a presión</i>	10
Figura 4. <i>Termoformado a presión</i>	11
Figura 5. <i>Sistema de control</i>	12
Figura 6. <i>Sistema de calentamiento</i>	13
Figura 7. <i>Sistema estructural</i>	14
Figura 8. <i>Sistema de formado</i>	15
Figura 9. <i>Sistema de desplazamiento neumático</i>	16
Figura 10. <i>Esquema frontal de la estructura</i>	17
Figura 11. <i>Esquema isométrico de la estructura</i>	18
Figura 12. <i>Esquema de referencia</i>	19
Figura 13. <i>Esquema general de viga</i>	19
Figura 14. <i>Diagrama de momentos y cortantes</i>	21
Figura 15. <i>Esquema viga reacciones con apoyos</i>	22
Figura 16. <i>Esquema de viga corte en la viga distribuida</i>	22
Figura 17. <i>Esquema de corte posterior a la carga distribuida</i>	24
Figura 18. <i>Análisis de la junta de la soldadura</i>	34
Figura 19. <i>Vista lateral de la estructura</i>	34
Figura 20. <i>Esquema de la soldadura filete</i>	35
Figura 21. <i>Bosquejo del horno</i>	38
Figura 22. <i>Esquema de la cabina</i>	38
Figura 23. <i>Relación de factor de forma en un plano</i>	44
Figura 24. <i>Refracción en tubos</i>	45
Figura 25. <i>Análisis de calor pared lateral</i>	48
Figura 26. <i>Análisis de la pared frontal</i>	49
Figura 27. <i>Análisis de la pared superior del horno</i>	50
Figura 28. <i>Mesa de vacío</i>	54
Figura 29. <i>Volumen de la tolva</i>	55
Figura 30. <i>Volumen de la cámara de termoformado</i>	56

Figura 31. <i>Esquema de conexiones</i>	57
Figura 32. <i>Perdidas en accesorios</i>	60
Figura 33. <i>Pérdidas en codos</i>	60
Figura 34. <i>Esquema eléctrico</i>	63
Figura 35. <i>Esquema electrónico</i>	64
Figura 36. <i>Interruptor on/off</i>	65
Figura 37. <i>Relé de estado sólido</i>	65
Figura 38. <i>Paro de emergencia</i>	65
Figura 39. <i>Arduino</i>	66
Figura 40. <i>Display</i>	66
Figura 41. <i>Deformación máxima</i>	70
Figura 42. <i>Simulación esfuerzo de von mises</i>	70
Figura 43. <i>Análisis factor de seguridad</i>	71
Figura 44. <i>Análisis esfuerzo a compresión</i>	72
Figura 45. <i>Análisis de la presión crítica de la columna</i>	72
Figura 46. <i>Análisis deflexión máxima</i>	73
Figura 47. <i>Esfuerzo de von mises</i>	73
Figura 48. <i>Factor de seguridad</i>	74
Figura 49. <i>Análisis de la parte superior del horno</i>	74
Figura 50. <i>Análisis general del horno</i>	75
Figura 51. <i>Análisis horno y lámina</i>	75
Figura 52. <i>Simulación neumática</i>	76
Figura 53. <i>Energización del circuito</i>	77
Figura 54. <i>Temperatura de la lámina</i>	78
Figura 55. <i>Inicio del vaciado</i>	79
Figura 56. <i>Tiempo de vaciado</i>	79
Figura 57. <i>Reinicio del sistema</i>	80
Figura 58. <i>Gráfico de barras</i>	81

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Polímeros</i>	9
Tabla 2. <i>Sistema de control máquina termoformadora</i>	12
Tabla 3. <i>Sistema de calentamiento de la lámina</i>	13
Tabla 4. <i>Sistema estructural</i>	14
Tabla 5. <i>Sistema de vacío</i>	15
Tabla 6. <i>Sistema de desplazamiento de la lámina</i>	16
Tabla 7. <i>Matriz de decisión estructural</i>	17
Tabla 8. <i>Masas del Pet</i>	39
Tabla 9. <i>Temperaturas distintos materiales</i>	39
Tabla 10. <i>Matriz de decisión aislante del horno</i>	40
Tabla 11. <i>Propiedades termofísicas del aire</i>	40
Tabla 12. <i>Propiedades termofísicas</i>	46
Tabla 13. <i>Selección de bombas</i>	53
Tabla 14. <i>Selección de mangueras</i>	54
Tabla 15. <i>Propiedades termofísicas</i>	58
Tabla 16. <i>Matriz de decisión ejecutador del programa</i>	63
Tabla 17. <i>Condiciones de Borde</i>	67
Tabla 18. <i>Comparativo diseño vs Simulación</i>	68
Tabla 19. <i>Comparativa diseño vs Simulación</i>	68
Tabla 20. <i>Comparativa diseño vs Simulación térmica</i>	68
Tabla 21. <i>Análisis de resultados neumática</i>	69
Tabla 22. <i>Análisis de resultados sistema eléctrico y electrónico</i>	69
Tabla 23. <i>Comparativa diseño vs Simulación térmica</i>	81
Tabla 24. <i>Comparativa diseño vs Simulación térmica</i>	82

RESUMEN

Se realizó el diseño y simulación de una máquina de termoformado para laboratorio de conformado mecánico de la Universidad Politécnica Salesiana, necesaria para el estudio de los procesos de termoformado, mediante el análisis de los sistemas que componen la máquina termoformadora, validando los resultados obtenidos con simulaciones computacionales.

Para ello se realizaron una selección de alternativas de los diferentes componentes para el funcionamiento eléctrico de todos los elementos como pedal neumático, paro de emergencia y botoneras, resistencias eléctricas; el tipo de sistema de calentamiento si sería a gas, por radiación o por resistencias; el tipo de material a utilizar en la estructura como acero, aluminio, aleaciones de acero y el sistema de formado a implementar por vacío, mecánico o por gravedad.

Estructuralmente se obtuvo un esfuerzo calculado de Von Mises de $13,93 * 10^6 \text{N/m}^2$ con un error del 0,28% respecto al valor simulado y un factor de seguridad de 15 teniendo un margen amplio siendo más segura la construcción de esta estructura, térmicamente se obtuvo una temperatura de la lámina calculada de $140 \text{ }^\circ\text{C}$ con un margen de error del 2,14% respecto al simulado, neumáticamente se obtuvo la potencia de la bomba de vacío de 2,12 Watts sin embargo es necesario tomar una potencia superior considerando la de 10 W. por último al realizarse un análisis de sistema eléctrico de la máquina nos entregó la temperaturas de la lámina a $140 \text{ }^\circ\text{C}$, el tiempo de succión de la bomba.

Finalmente, las simulaciones nos mostraron datos de los diferentes diseños con un margen de error menor al 5 % evaluados en Ansys, Fluidsim, Proteus y Arduino IDE demostrando la valides de los datos calculados.

Palabras Clave: bomba de vacío, circuito, diseño, simulación, termoformado

ABSTRACT

The design and simulation of a thermoforming machine for the mechanical forming laboratory of the Salesian Polytechnic University, necessary for the study of thermoforming processes, was carried out through the analysis of the systems that make up the thermoforming machine, validating the results obtained with simulations. computational.

For this, a selection of alternatives of the different components was made for the electrical operation of all the elements such as pneumatic pedal, emergency stop and button panels, electrical resistances; the type of heating system if it would be gas, radiation or resistance; the type of material to be used in the structure such as steel, aluminum, steel alloys and the forming system to be implemented by vacuum, mechanical or gravity.

Structurally, a calculated Von Mises stress of $13.93 * 10^6 \text{N/m}^2$ was obtained with an error of 0.28% compared to the simulated value and a safety factor of 15, having a wide margin, the construction of this structure being safer, thermally a calculated sheet temperature of $140 \text{ }^\circ\text{C}$ with a margin of error of 2.14% compared to the simulated, the power of the vacuum pump of 2.12 Watts was obtained pneumatically, however it is necessary to take a higher power considering that of 10 W. finally, when carrying out an analysis of the electrical system of the machine, gave us the temperatures of the sheet at $140 \text{ }^\circ\text{C}$, the suction time of the pump. Finally, the simulations showed us data from the different designs with a margin of error of less than 5% evaluated in Ansys, Fluidsim, Proteus and Arduino IDE, evidencing the validity of the calculated data.

Keywords: vacuum pump, circuit, design, simulation, thermoforming

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

El termoformado en general requiere de moldeos negativo, moldeos positivo y moldeos por estampado en los cuales sus configuraciones para obtener el producto final son diferentes, sin embargo tienen variables en común como temperatura y proceso de enfriamiento, Adicionalmente el tipo de maquinaria a usarse ya sea con resistencias de calefactores y mediante carga manual o totalmente automatizadas, materiales, moldes y defectos [1].

En donde se evalúan procesos en láminas PVC en formato A4 (210x297 mm), obteniendo datos que varía en el estudio son potencia, tiempo y temperatura de conformado, su correlación. Escogiendo los parámetros necesarios evitando que existan pliegues, rotura de láminas al final de todo el proceso [2].

Según Lidia Castro es necesario desarrollar un modelo matemático de planchas termoformadas para la producción en serie, se llega a la estabilidad térmica para las que las planchas tengan las dimensiones homogéneas, esto permite que se pueda garantizar las tolerancias adecuadas y dar la máxima estabilidad de temperatura. Obteniendo resultados de perfil de temperaturas para un horno resistivo [3].

Según Trujillo Vanegas los cálculos de una máquina termoformadora al vacío, se determina los espesores necesarios para moldear una lámina PET, se toma en cuenta las características de las máquinas de Plastimec E.U, que mediante conceptos de transferencia de calor se aplican para poder sacar resultados óptimos de la potencia adecuada para nuestro equipo [4].

Se obtienen resultados del comportamiento del estado deformación máxima del material sometido a altas temperaturas en el material base PET para formatos de hoja establecidos para poder observar cómo se comporta el material en un termoformado [5].

PROBLEMA

Los estudiantes universitarios no tienen acceso a una máquina termoformadora para poder analizar los fenómenos térmicos que ocurren en las láminas de polímeros. Además, existen máquinas de termoformado que se han construido de forma artesanal teniendo un rendimiento muy bajo, existiendo eventualidades por el uso de las mismas, por lo cual es fundamental desarrollar una máquina termoformadora haciendo un análisis ingenieril.

JUSTIFICACIÓN

El mundo automatizado en el que vivimos exige cada vez mejoras tecnológicas en las máquinas empleadas en el sector industrial, como las realizadas en el ámbito académico, es por ello que la comunidad universitaria necesita de una máquina termoformadora que permita desarrollar los procesos de aprendizaje experimentalmente de toda la comunidad universitaria, para que cuando salgan al mundo laboral puedan obtener la experiencia necesaria para realizar trabajos similares con mayor facilidad.

Es de suma importancia que los cálculos del diseño de la máquina termoformadora sean validados mediante software especializados, la forma de solución de los mismos es mediante elementos finitos que es una aproximación bastante cercana a la realidad.

Los resultados finales de las máquinas termoformadora servirán para construir en futuros trabajos de titulación; Comprobando, validando y ejecutando el desarrollo del trabajo

El análisis de las ecuaciones de intercambio de calor que intervienen en el diseño térmico de la máquina despierta un gran interés en los estudiantes y profesionales, siendo necesario desarrollar un procedimiento para el dimensionamiento de este tipo de máquinas.

En ingeniería mecánica es suma importancia conocer los elementos neumáticos mismos que permiten el movimiento de diferentes máquinas siendo de gran relevancia en la mayoría de labores industriales.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Diseñar y simular de forma estática una máquina termoformadora al vacío para el laboratorio de conformado mecánico de la Universidad Politécnica Salesiana.

OBJETIVO ESPECÍFICOS:

- Revisar la situación actual del proceso de termoformado en polímeros
- Seleccionar las características del equipo acorde a las condiciones físicas de laboratorio
- Diseñar el sistema térmico, neumático, mecánico, eléctrico y electrónico del equipo
- Diseñar la estructura de la máquina termoformadora para que soporte las cargas de funcionamiento
- Validar los resultados analíticos con la utilización del software
- Establecer la factibilidad económica de la implementación del proyecto en el laboratorio

METODOLOGÍA

La parte inicial de nuestra investigación se centró en la recolección de información del origen y composición de los polímeros, procesos más empleados del termoformado, sus principales ventajas y desventajas, temperaturas de deformación, técnicas y moldes empleados; que mediante una selección de alternativas de los diferentes componentes de la máquina fueron de referencia para realizar una serie de cálculos, obteniendo el diseño más adecuado para una máquina de termoformado.

Este diseño se validará por medio de softwares de simulación computacional que entregaron resultados los cuales fueron comparados con los analíticos dándonos un margen de error aceptable que con un análisis económico demostró la factibilidad del proyecto.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

Se analiza la situación actual de los polímeros que se utilizaran para la propuesta tecnológica, sus características principales, ventajas, desventajas aplicaciones y situación actual en la industria.

1.1. Origen de los Polímeros

En la antigüedad se utilizaron diferentes materiales poliméricos naturales para satisfacer diferentes necesidades cotidianas en todo el mundo mediante el empleo de algodón, lana y seda posteriormente a un avance industrial se comenzaron a desarrollar nuevas sustancias químicas dando origen a los polietilenos, polivinilos que son utilizados en la industria en general.

En la actualidad en la que vivimos existen moléculas de gran tamaño conocidas como macromolécula, las cuales están compuestas por la unión de muchos átomos por lo que poseen un peso molecular grande. Los polímeros son caracterizados por tener cadenas de unidades que se entrelazan entre sí y se duplican lo largo de su estructura molecular formando monómeros, este proceso químico de combinación se llama polimerización, si pudiéramos darle una nomenclatura a estos procesos diríamos que la unión de varias moléculas a lo largo de la molécula como ,de igual manera al grado de polimerización, por otro lado para poder obtener el peso molecular es necesario multiplicar el peso de la unidad a lo largo de sus estructura molecular con el grado de polimerización. Cabe denotar que el estudio de las macromoléculas no tiene limitantes en cuanto a materiales biológicos en sí, sino que también analiza el comportamiento de otros componentes como biomoléculas [6].

Al no tener en si un concepto en específico de los polímeros podemos definirlos también como partículas de grandes dimensiones, formadas por “elementos” orgánicos llamados monómeros, entrelazados mediante enlaces químicos covalentes. Estos elementos están conformados, fundamentalmente, por átomos de carbono y otros elementos adicionales pertenecientes a los grupos radicales entre algunos átomos **Figura 1** [7].



Figura 1. estructura del polietileno, [7]

1.2. Características Polímeros

1.2.1. PET:

- Es bastante tratable en procesos de soplado, inyección y extrusión
- Tiene muchas aplicaciones para plásticos para producción de diferentes protecciones
- Posee excelentes propiedades mecánicas
- Tiene un bajo costo
- Se lo puede reciclar
- Es bastante liviano
- No se desgasta con facilidad
- Es bastante moldeable [8]

1.2.2. PVC:

- Es bastante económico
- Es reciclable
- Posee gran flexibilidad
- Elasticidad superior al acero
- E resistente a propiedades ambientales
- Gran resistencia a la tracción [9]

1.3. Tipos de polímeros

1.3.1. Según su origen

Polímeros naturales: Son de origen natural, es decir no interviene ningún proceso físico o químico que altere su composición.

Polímeros semisintéticos: Son alteraciones de los polímeros de origen natural que mediante procesos químicos generan sustancias como cauchos vulcanizados.

Polímeros sintéticos: Se obtienen industrialmente con reacciones químicas realizadas a la composición de un polímero obteniendo polietilenos o poliestirenos.

1.3.2. Según su estructura

Un polímero puede clasificarse como lineal o ramificado dependiendo de su estructura en el caso de los polietilenos poseen una estructura lineal, sin embargo, el policloruro de vinilo posee una estructura ramificada al tener enlaces fuera de su cadena principal.

1.3.3. Según su comportamiento térmico

Los polímeros termoplásticos se pueden moldear al calentarse estos son polietilenos, polipropilenos y pet. Los polímeros termoestables son aquellos que al calentarse se descomponen químicamente estos son la baquelita.

1.3.4. Según la unión de sus monómeros

Cuando un polímero se forma por la unión de un único monómero denominado homopolímero, si se tiene dos polímeros diferentes se llaman copolímeros dentro de estos copolímeros tenemos el copolímero alternado en el cual los monómeros se repiten uno a continuación del otro, en bloque en el cual los monómeros están agrupados en una zona de la molécula y al azar no existe ningún orden de repetición de sus monómeros [10].

1.4. Ventajas y Desventajas

1.4.1. PET:

Dentro de sus principales ventajas tenemos a su claridad, brillo, transparencia, bajo impacto ambiental, termoformación, posee un precio menos fluctuante en relación a los otros polímeros existe gran producción en varios países como en Suramérica, Norteamérica y Asia. Al generar un bajo impacto al medio ambiente por su proceso de reciclado el cual da lugar a un material conocido Tereftalato de polietileno reciclado (RPET), lastimosamente este material no se emplea en la fabricación de envases para las industrias alimenticias al tener temperaturas más elevadas en el proceso de reciclaje asegurando la esterilización del producto. Es por ello que se han ido perfeccionando el reciclado de este polímero a tal fin que materiales reciclados pueden ser usados para estar en contacto con alimentos.

Por otro lado, sus principales desventajas de este polímero es que debe tener un proceso de secado a fin de evitar perder las cualidades del material teniendo como tolerancia máxima una humedad de 0.005%. Por lo que es recomendado emplear la técnica de secado mediante

aire caliente antes de ser procesados en procesos mecánicos. Generando un costo adicional; sin embargo, si se emplea en sus procesos el soplado en grandes producciones no se generan altos gastos, por su versatilidad para la obtención de diferentes tamaños y formas se emplean equipos estándar de pvc, pierden propiedades al ser sometidos a temperaturas superiores a 70 grados centígrados y por último no son muy útiles al someterlos a la intemperie.

1.4.2. PVC:

Dentro de sus principales ventajas es que posee gran resistencia mecánica, moldeabilidad, posee buenas propiedades de aislación ante el ruido, calor y el paso de la corriente, necesita de otros elementos para su uso comercial ya que en si tiene poca elasticidad para adaptarse a formas cuando no es sometido a un proceso de dilatación, no requiere grandes cantidades de consumo de energía para su fabricación y es adaptable dependiendo de la aplicación a ser empleado.

Por otra parte, sus principales desventajas es que sus componentes son altamente tóxicos por ejemplo el dicloruro de etileno puede producir efectos muy nocivos en la salud incluso llegando a alteraciones genéticas, daños a los órganos y enfermedades sanguíneas, de igual manera en su fabricación se producen gases tóxicos los cuales pueden ocasionar accidentes graves [11].

1.5. Aplicaciones de los polímeros

El Tereftalato de polietileno (PET) es un elemento polimérico muy implementado en la construcción de envases, en la industria textil, para poder conservar diferentes comestibles que no requieran altas temperaturas, mantener temperaturas de productos alimentarios, alojar líquidos y todo tipo de elementos en general.

El Policloruro de vinilo (PVC) se emplea en la elaboración de juguetes, envases, tubos, cables y ventanas de igual manera en la industria es muy empleado como aislante ante la electricidad en la construcción en conjunto con perfilería, placas de aislación, estuches de cables, protecciones para suelos [12].

1.6. Temperaturas de Polímeros para el termoformado

En la tabla 1 se puede observar tanto las temperaturas en las que se reblandecen diferentes polímeros

Tabla 1 como sus temperaturas de termoformado

Tabla 1. Polímeros [13]

POLIMEROS	TEMPERATURA DE DEFLECCIÓN DEL CALOR			TEMPERATURA DE TERMOFORMADO		
	264 PSI	66 PSI	SIN CARGA	TEMP DE LA HOJA	TEMP DEL MOLDE	TEMP DE AYUDA
Acrílico extruido	94	98		135-175	65-75	
Acrílico acrycast	96	110		160-180	65-75	
Acetato butirato de celulosa	65-75	75-80	120-150	140-160		
Polietileno de alta densidad		60-80	100	145-190	95	170
Polipropileno	55-65	110-115	140	145-200		
Poliestireno	70-95	70-100	100	140-170	45-65	90
Poliestireno de alto impacto	85-95	90-95	120	170-180	45-65	90
SAN	100	105		220-230		
ABS	75-115	80-120	95	120-180	70-85	90
PVC	70	75	110	135-175	45	80
Policarbonato	130	140	160	180-230	95-120	140

1.7. Técnicas de termoformado

1.7.1. Termoformado al vacío

Es uno de las técnicas con más antigüedad llamada así desde los años 50 que con una presión inversa fija la lámina precalentada dentro del comportamiento del alojamiento del molde, es un procedimiento que permite dar la forma requerida a diferentes materiales poliméricos mediante su exposición al calor ablandando el material que se formara y consecuentemente mediante esta aplicación de sistema de vacío entre la separación entre el material y el molde, se produce una deformación del material base adoptando la forma del molde matriz **Figura 2** .Posteriormente después de un proceso de enfriamiento adquiere la rigidez propia del material conservando la forma deseada, este proceso es de gran utilidad para realizar diferentes moldes para diferentes industrias como las que elaboran chocolate y gelatinas [11].

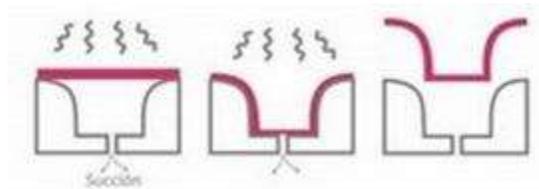


Figura 2.Termoformado al vacío [11]

1.7.2. Termoformado a presión

Otro proceso de formado involucra una presión inversa al anterior sistema , es decir una presión que fuerce al plástico calentado dentro del alojamiento del molde a adquirir su forma, este proceso tienen la particularidad de mayormente se emplea en el conformado por soplado , la ventaja principal con el anterior proceso es la presión que se puede ejercer sobre la lámina en este caso podemos aplicar presiones muy elevadas hasta 4 atm, **Figura 3** de igual manera posee un sistema de ventilación que permita salir el aire atrapado [11].

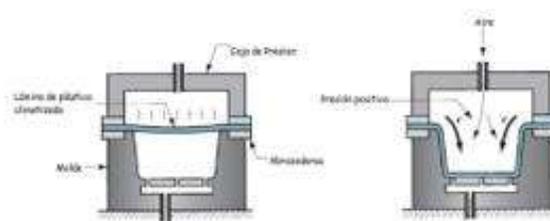


Figura 3. Termoformado a presión [11]

1.7.3. Termoformado mecánico

Este último método usa moldes negativos como positivos contra la lámina calentada forzándola a adquirir su forma, las ventajas que posee este método es tener un mejor control de las dimensiones y calidad en ambos lados de la pieza **Figura 4** .La desventaja es que se requieren las dos partes del molde tanto macho como hembra y por ende es costoso [11]

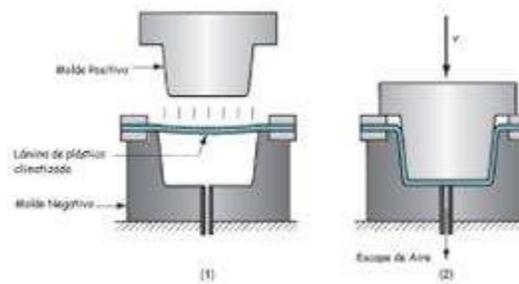


Figura 4. Termoformado a presión [11]

1.8. Moldes para termoformado

1.8.1. Moldes de Madera

Se fabrican a partir de maderas tratadas al horno en el proceso de calentamiento [11].

1.8.2. Moldes de Escayola

Son aquellos que están reforzados con fibra de vidrio, poseen una gran durabilidad, es importante tener un modelo matriz con resistencia a altas temperaturas producidas por el fraguado del yeso [11].

1.8.3. Moldes de Aluminio

Estos moldes son de una muy buena calidad y son mecanizados para moldes más económicos puede utilizarse la colada, suelen presentar imperfecciones presentando inconvenientes para poder regular su temperatura [11].

1.8.4. Moldes de Acero

No son de gran precisión en comparación con los procesos de inyección de materia, sin embargo, se pueden emplear para aplicaciones específicas de la industria en general, sus características más relevantes son su fácil mecanización y menor riesgo de deformación al endurecimiento [11].

1.9. Selección de Alternativas

1.9.1. Sistema de control

En la figura 5 observamos el sistema de control tanto para el encendido, apagado del horno, accionamiento por pedal desplazamiento lámina **Figura 45**, paro de emergencia y control en general del circuito eléctrico de la máquina termoformadora.



Figura 5. Sistema de control [14]

En la tabla 2 se realizó una matriz de decisión sobre si el sistema de la máquina debería ser o manual, semiautomático o totalmente automatizado **Tabla 2** obteniendo como mayor puntuación a la opción semiautomática.

Tabla 2. Sistema de control máquina termoformadora

FACTORES	ALTERNATIVAS		
	A	B	C
Facilidad de realización	7	4	5
Precio	6	2	4
Durabilidad	2	7	6
Seguridad	2	7	4
Estética	4	9	5
TOTAL	21	29	24

1.9.2. Sistema de calentamiento de la lámina

En la figura 6 se observa el sistema de calentamiento de un horno con una resistencia en serpentín que sería usado en nuestro sistema *Figura 6* de calentamiento del equipo.



Figura 6. Sistema de calentamiento [15]

En la tabla 3 se analiza se realizó una matriz de decisión en cuanto al tipo de calentamiento que tendría la cabina pudiendo ser a gas, radiación infrarroja, eléctrico o por resistencias en serpentín obteniendo la mayor puntuación la resistencia en serpentín **Tabla 3** con la que se realizara la propuesta tecnológica.

Tabla 3. Sistema de calentamiento de la lámina

FACTORES	ALTERNATIVAS			
	A	B	C	D
Facilidad de construcción	3	7	8	8
Costo	5	6	7	9
Durabilidad	7	6	9	5
Seguridad	5	8	7	8
Estética	9	8	7	9
TOTAL	29	35	38	39

1.9.3. Materiales del Sistema mecánico:

En la figura 7 se muestra una estructura mecánica en general de una máquina **Figura 7** termoformadora.



Figura 7. Sistema estructural [16]

En la tabla 4 se realiza una matriz de decisión en cuanto a el material a diseñar la estructura pudiendo ser en acero, aluminio, plástico o Aleaciones de acero **Tabla 4** ganando el acero A36.

Tabla 4.Sistema estructural

FACTORES		ALTERNATIVAS			
		A	B	C	D
Facilidad de construcción		7	6	5	8
Costo		8	4	7	6
Durabilidad		8	7	6	8
Seguridad		7	6	4	7
Estética		8	7	7	8
TOTAL		38	30	29	37

1.9.4. Sistema de formado

En la figura 8 se muestra el proceso de vacío que tiene la lámina en una máquina termoformadora **Figura 8** al ser sometida a una fuente de calor.

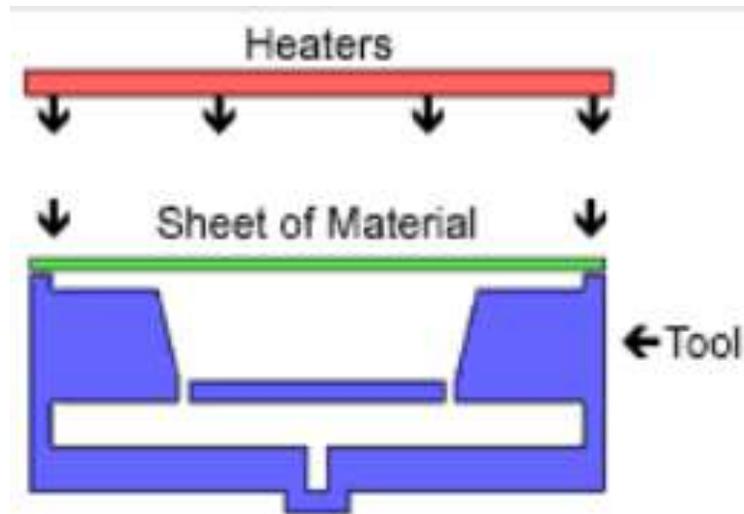


Figura 8. Sistema de formado [17]

En la tabla 5 se realiza una matriz decisión en cuanto al tipo de formado a utilizarse pudiendo ser a presión, por vacío, termoformado combinado por gravedad y vacío **Tabla 5** obteniendo el mayor puntaje el termoformado al vacío.

Tabla 5. Sistema de vacío

FACTORES	ALTERNATIVAS		
	A	B	C
Facilidad de realización	6	5	7
Costo	7	6	6
Durabilidad	8	7	4
Seguridad	7	5	6
estética	8	7	5
TOTAL	36	30	28

1.9.5. Sistema de desplazamiento de la lámina

En la figura 9 se muestra el desplazamiento de la mesa de vacío de la maquina termoformadora tanto al estar cerca la lámina con la cabina de termoformado *Figura 9*, como cuando baja la lámina y entra en contacto con el molde adquiriendo su forma mediante un proceso de vacío.



Figura 9. Sistema de desplazamiento neumático [18]

En la tabla 6 se realizó una matriz de decisión donde se evaluó como posibilidades el mecanismo de elevación por pistones, servomecanismos, palancas y correderas obteniendo como mayor puntuación el sistema de pedal con desplazamiento por pistón **Tabla 6** con el cual se diseñó el sistema neumático.

Tabla 6. Sistema de desplazamiento de la lámina

FACTORES	ALTERNATIVAS			
	A	B	C	D
Facilidad de realización	5	3	7	7
Precio	4	2	6	6
Durabilidad	8	7	3	5
Seguridad	8	7	4	7
estética	8	7	5	6
TOTAL	33	26	25	31

CAPITULO II

DISEÑO Y SIMULACIÓN MÁQUINA TERMOFORMADORA

El objetivo del presente capítulo es diseñar y simular una máquina termoformadora mediante cálculos teóricos y simulaciones que validen los resultados obtenidos.

1.10. DISEÑO MECÁNICO

1.10.1. Matriz de decisión

En la tabla 7 se realizó una matriz de decisión donde se evaluó como posibilidades de los tipos de perfiles a usarse como en L, tubo cuadrado, tubo rectangular y tubos redondos **Tabla 7** siendo el ganador el tubo rectangular por su menor precio y capacidad.

Tabla 7. Matriz de decisión estructural

	Puntaje	PERFIL EN L	TUBO CUADRADO	TUBO RECTANGULAR	TUBO REDONDO
Precio	20	20	15	18	10
Facilidad para soldar	20	15	15	15	5
Capacidad de carga	40	20	40	35	40
Estética	10	8	8	10	5
Accesibilidad de compra	10	8	9	10	4
Total	100	71	87	88	64

1.10.2. Esquema General:

En la figura 10 se observa el esquema de la máquina termoformadora desde una vista frontal **Figura 10**.

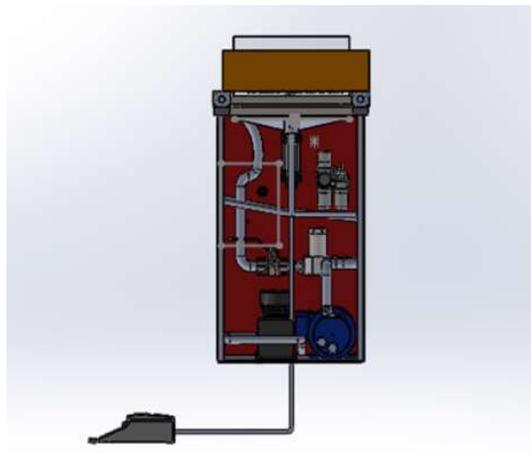


Figura 10. Esquema frontal de la estructura

En la figura 11 se observa la maquina termoformadora desde una vista isométrica principalmente como se traslada la cabina del horno, donde está colocada la cámara de termoformado y el panel de control y la parte estructural **Figura 11** de cómo está compuesta la máquina.



Figura 11. Esquema isométrico de la estructura

1.10.3. Análisis de reacciones en vigas

En esta sección se analizará las reacciones de la viga con un tubo de 0.02x0.04x0.002 m y una carga distribuida de 390,69 N/m=117,21 N, para ello primeramente obtenemos sus propiedades geométricas.

$$I_x=4,06 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$I_y=1,35 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$S_x= 2.03 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$S_y= 1.35 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$r_x= 0.0138 \text{ m}$$

$$r_y=0.0079 \text{ m}$$

En la figura 12 se puede observar a la viga principal que se analizará en la cual con rodamientos para eje circular soportan la cabina del horno **Figura 12** de termofromado.



Figura 12. Esquema de referencia

En la figura 13 se observa el esquema de la viga principal **Figura 13** con su carga distribuida y las reacciones de los apoyos que son obtenidas mediante sumatorias de fuerzas y momentos.

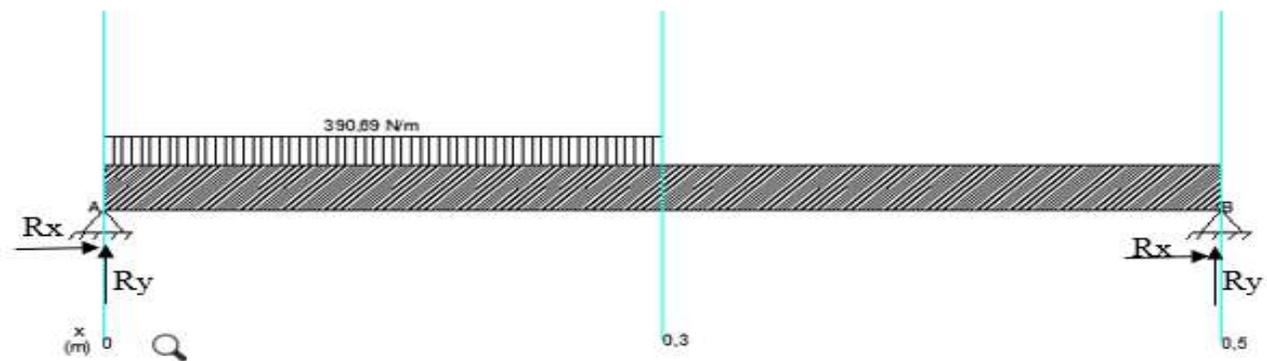


Figura 13. Esquema general de viga [19]

Reacciones

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma F_z = 0$$

Sumatoria de Fuerzas

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$a_y + 35,16 - 117,21N = 0$$

$$a_y = 82,04N$$

$$\Sigma F_z = 0$$

$$0 = 0$$

Sumatoria de Momentos

 $\Sigma M_a = 0$

$$-117,21 * 0,15 + b_y (0,5) = 0$$

$$b_y = 35,16N$$

Reemplazando en la fórmula planteada anteriormente

$$a_y = 116,42 - b_y$$

$$a_y = 117,21 - 35,16$$

$$a_y = 82,04 N$$

 $\Sigma M_b = 0$

$$117,21 * 0,35 - a_y (0,5) = 0$$

$$a_y = 82,04N$$

1.10.4. Momento máximo Áreas:

En la figura 14 se observan los gráficos de cortante máximo y momentos máximos **Figura 14** de nuestra viga.

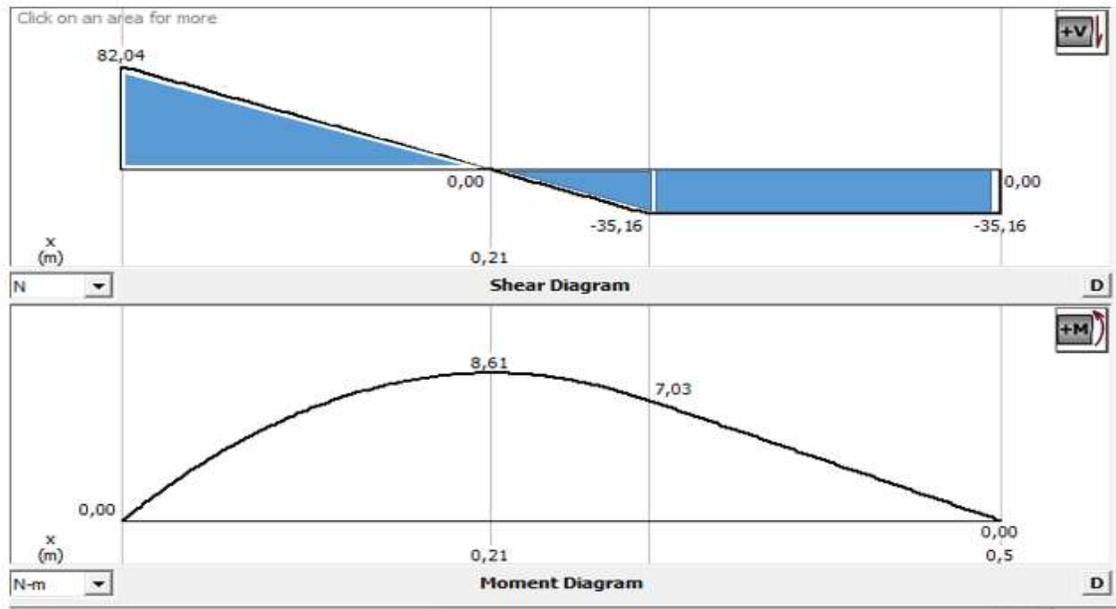


Figura 14. Diagrama de Momentos y cortantes [20]

$$M_{\max} = \frac{b * h}{2} \quad (1)$$

$$M_{\max} = (0,21 * 82,04) / 2$$

$$M_{\max} = 8,61 \text{ N-m}$$

$$M_{\max} = (b * h) \quad (2)$$

$$M_{\max} = 0,2\text{m} * 35,16 \text{ N}$$

$$M_{\max} = 7,03 \text{ N} - \text{m}$$

En la figura 15 se observa la viga general con la carga distribuida y las reacciones obtenidas en los dos apoyos **Figura 15** de los cálculos realizados en la figura 13.

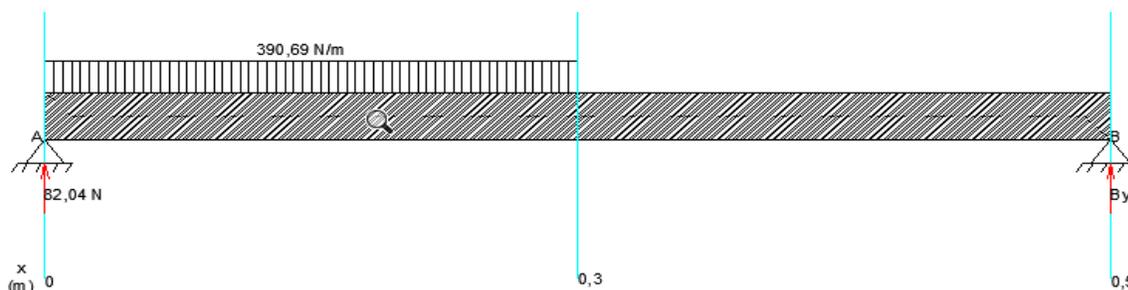


Figura 15. Esquema viga reacciones con apoyos [19]

En la figura 16 se observa un corte de la viga principal realizado por el método de secciones en el cual hallamos el M_1 **Figura 16** y cortante en un tramo de la viga.

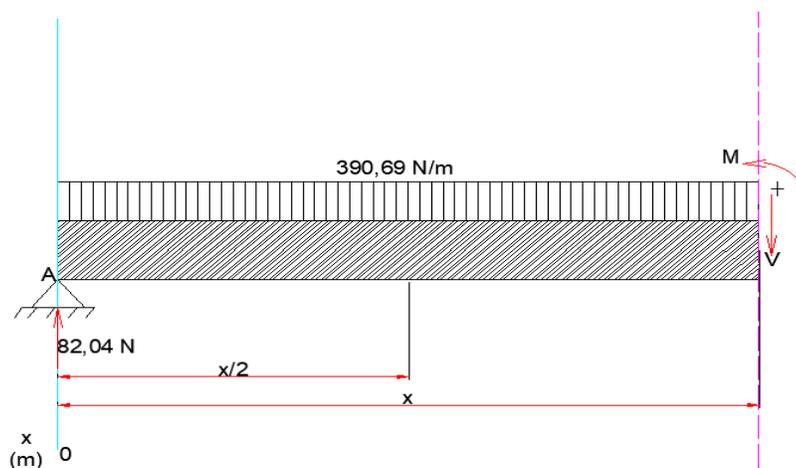


Figura 16. Esquema de viga corte en la carga distribuida [19]

$$\Sigma F_y = 0$$

$$A_y - 390,69(x) - V = 0$$

$$82,04 - 390,69(x) = V$$

$$\text{Si } x=0$$

$$82,04 - 390,69(0) = V$$

$$82,04 = V$$

$$\text{Si } x=0,3$$

$$82,04 - 390,69(0,3) = V$$

$$35,16 = V$$

$$82,04 - 390,69(x) = 0$$

$$82,04 = 390,69(x)$$

$$x = 0,209$$

$$\begin{array}{c} \text{+} \\ \text{+} \end{array} \Sigma M_a = 0$$

$$-82,04(x) + 390,69 \left(x * \frac{x}{2} \right) + M1 = 0$$

$$-82,04(x) + 390,69 \left(\frac{x^2}{2} \right) + M1 = 0$$

$$-390,69 \left(\frac{x^2}{2} \right) + 82,04 x = M1$$

$$\text{Si } x = 0$$

$$-390,69 \left(\frac{0^2}{2} \right) + 82,04 * 0 = M1$$

$$M1 = 0$$

Para momento máximo:

$$-390,69 \left(\frac{x^2}{2} \right) + 82,04 x = 0$$

Se deriva:

$$-390,69 \left(\frac{2 * x}{2} \right) + 82,04 = 0$$

$$-390,69x + 82,04 = 0$$

$$82,04 = 390,69x$$

$$x = 0,21$$

$$\text{Si } x = 0,21$$

$$M1=8,61$$

En la figura 17 se observa un segundo corte de la viga principal realizado por el método de secciones **Figura 17** en el cual hallamos el Momento máximo.

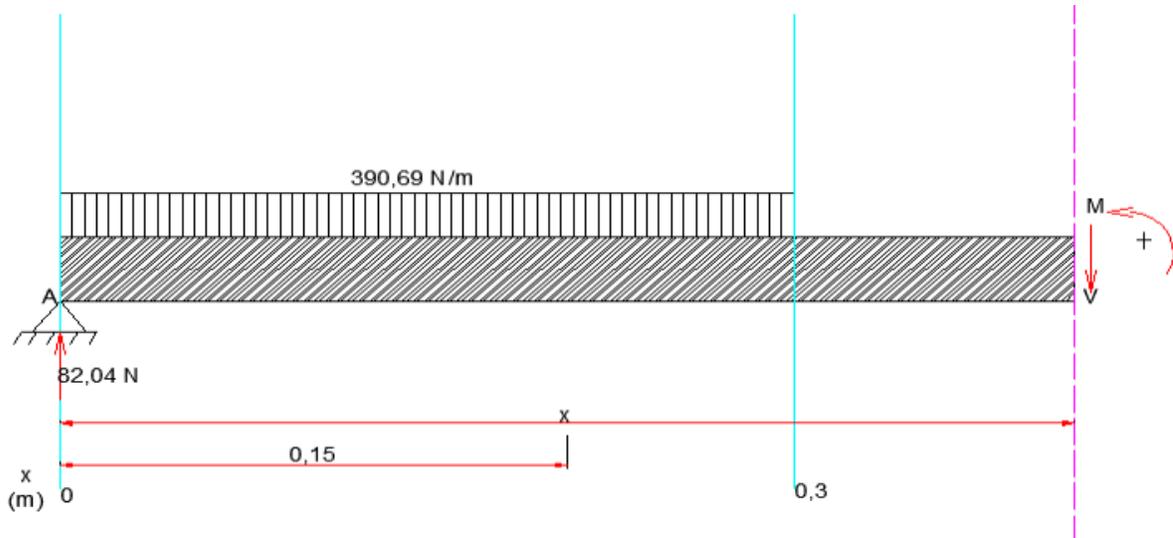


Figura 17. Esquema de corte posterior a la carga distribuida [19]

$$\Sigma M = 0$$

$$-82,04(x) + 117,21(x - 0,15) + M2=0$$

$$-82,04(x)+117,21 (x)-17,58=0$$

$$-35,17 x+17,58=M2$$

$$\text{Si } x=0,3$$

$$M2=7,03$$

Evaluando para el momento máximo:

$$\begin{matrix} \oplus \\ -35,17 x+17,58=0 \end{matrix}$$

$$-35,17x=-17,58$$

$$x=0,5$$

En esta subsección se calculará los esfuerzos máximos de la viga debido a flexión a partir de una línea neutra, los datos de la ecuación fueron obtenidos de la figura 16 cuando $x=0$ para el Momento por cortes, el centroide es la mitad de la cara del tubo tanto para el eje x como y, la inercia está dada por el catálogo de ipac [21].

1.10.5. Esfuerzos

Evaluando la sección Inercia x

$$\sigma_x = \frac{+Mc}{I} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{+8.610(N * m) * 0.01 m}{4.06 * 10^{-8} m^4}$$

$$\sigma = 2.12 * 10^6 N/m^2$$

Evaluando la sección Inercia y

$$\sigma_y = \frac{+Mc}{I}$$

$$\sigma = \frac{+8.610(N * m) * 0.02 m}{1,35 * 10^{-8} m^4}$$

$$\sigma = 1.275 * 10^7 N/m^2$$

Donde:

M: Momento [N*m]

c: centroide del tubo [m]

I: Inercia [m⁴]

El criterio de Von Mises es un criterio estático aplicado a la viga en un punto en el cual el material no fluirá para ellos es necesario obtener el cortante en y cuando $x=0,3$ de la figura 16 y evaluar sus esfuerzos principales obtenidos tanto para eje x como y con ellos obtener el cortante máximo y esfuerzo de Von Mises como un criterio de diseño ante falla elástica [22].

1.10.6. Von Mises:

Sección crítica en 0,15 m

$$T_y = -35,16 \text{ N}$$

Esfuerzo en x:

$$\sigma_x = 2,12 * 10^6 \text{ N/m}^2$$

Esfuerzo en y:

$$\sigma_y = 1.275 * 10^7 \text{ N/m}^2$$

Esfuerzo 1:

$$\sigma_1 = 2,12 * 10^6 \text{ N/m}^2$$

Esfuerzo 2

$$\sigma_2 = 1.275 * 10^7 \text{ N/m}^2$$

Esfuerzo 3

$$\sigma_3 = 0 \text{ Mpa}$$

Cortante máximo: considerando el mayor esfuerzo

$$T_{\max} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \tag{4}$$

$$T_{\max} = \frac{12,75 * 10^7 - 0}{2}$$

$$T_{\max} = 6,375 * 10^7 \text{ N/m}^2$$

Esfuerzo de Von Mises:

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$\sigma' = \left[\frac{(2,12 * 10^6 + 1,275 * 10^7)^2 + (1,275 * 10^7 - 0)^2 + (0 - 2,12 * 10^6)^2}{2} \right]^{1/2}$$

$$\sigma' = 13,93 * 10^6 \text{N/m}^2$$

Donde:

$T_y = \text{Cortante en } y \text{ [N]}$

$\sigma_1 = \text{Esfuerzo principal 1 [N/m}^2\text{]}$

$\sigma_2 = \text{Esfuerzo principal 2 [N/m}^2\text{]}$

$\sigma_3 = \text{Esfuerzo principal 3 [N/m}^2\text{]}$

$T_{max} = \text{Cortante máximo [N/m}^2\text{]}$

El factor de seguridad es un índice de seguridad de un determinado diseño para validar la resistencia mecánica de la viga, el valor de esfuerzo último como el permisible se obtuvo de tablas[23].

1.10.7. Factor de seguridad:

$$F_s = \frac{\sigma_u}{\sigma_{per}} \quad (6)$$

$$F_s = \frac{2,5 * 10^8 \text{N/m}^2}{16,7 * 10^6 \text{N/m}^2}$$

$$F_s = 15$$

Donde:

$F_s = \text{Factor de seguridad}$

$\sigma_u = \text{Esfuerzo ultimo [N/m}^2\text{]}$

$\sigma_{per} = \text{Esfuerzo permisible [N/m}^2\text{]}$

La deflexión máxima se aplica a elementos de viga que no estén unidos a elementos estructurales dándonos el desplazamiento máximo que puede tener la viga [24].

1.10.8. Deflexión máxima:

Esta fórmula fue obtenida de la norma IBC en la tabla 1604.4 nos da los límites de deflexión para construcción para miembros de techos [25].

$$L/240 = d \quad (7)$$

$$\frac{0,6\text{m}}{240} = d$$

$$d = 0,0025 \text{ m}$$

Donde:

L: Longitud del claro [m]

d: deflexión [m]

En esta sección se obtiene primeramente las propiedades geométricas del perfil con las cuales obtenemos la relación de esbeltez necesaria para los posteriores cálculos de esfuerzo, presión crítica, deflexión máxima y factor de seguridad a la que es sometida la columna: con un tubo de 0.025x0.025x0.0015 m

1.10.9. Cálculo de la relación de esbeltez según la geometría:

Área:

$$A = \emptyset e^2 - \emptyset i^2 \quad (8)$$

$$A = (0.025 \text{ m})^2 - (0.022 \text{ m})^2$$

$$A = 0.000141 \text{ m}^2$$

Inercia:

$$I = \frac{a^4}{12} \quad (9)$$

$$I = \frac{(0.025 \text{ m})^4}{12} - \frac{(0.022 \text{ m})^4}{12}$$

$$I = 1,3 * 10^{-8} \text{ m}^4$$

El radio de giro es una propiedad geométrica necesaria para encontrar la relación de esbeltez de la columna ya que nos permite saber la distancia hacia el eje de referencia a diseñar, la inercia se obtuvo de las propiedades geométricas del tubo al igual que el área [26].

1.10.10. Radio:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (10)$$

$$r = \sqrt{\frac{1.3 * 10^{-8} \text{ m}^4}{0.000141 \text{ m}^2}}$$

$$r = 9,61 * 10^{-3} \text{ m}$$

Donde:

r: radio de giro [m]

I: Momento de Inercia [m⁴]

A: Área [m²]

La longitud efectiva es una distancia entre los apoyos evaluados de la columna para evaluar la resistencia al pandeo donde *k* se obtuvo considera un extremo empotrado y otro libre y la longitud real es la longitud tomada de la máquina termoformadora [27].

1.10.11. Longitud efectiva:

$$L_e = K * L \quad (11)$$

$$L_e = 2,1 * 0.25 \text{ m}$$

$$L_e = 0.525 \text{ m}$$

Donde:

$L_e = \text{Longitud efectiva [m]}$

$k = \text{Constante que depende de los apoyos}$

$L = \text{Longitud real [m]}$

La relación de esbeltez es una relación rápida para calcular el fenómeno de pandeo en una columna que se obtiene con la longitud efectiva y radio de giro, obteniendo la esbeltez y la esbeltez crítica relación cumpliendo el criterio de esbeltez para columnas[28].

1.10.12. Relación de esbeltez:

$$Re = \frac{L_e}{r} \quad (12)$$

$$Re = \frac{0.525m}{9,61 * 10^{-3} m}$$

$$Re = 54,63$$

$$\lambda = 54,63$$

$$\lambda_{cr} = \sqrt{\frac{2 * E * \pi^2}{S_y}} \quad (13)$$

$$\lambda_{cr} = \sqrt{\frac{2 * 2 * 10^{11} N/m^2 * \pi^2}{2.5 * 10^8 N/m^2}}$$

$$\lambda_{cr} = 125,66$$

$$\lambda < \lambda_{cr}$$

Donde.

$L_e = \text{Longitud efectiva [m]}$

$r = \text{radio de giro [m]}$

$\lambda = \text{esbeltez}$

$\lambda_{cr} = \text{esbeltez critica}$

Este esfuerzo es la máxima capacidad que tiene un material de resistir a la presión sin falla la fuerza que se aplico es el peso de parte de la cabina y viga que soportaría la columna y el área se obtuvo de sus propiedades geométricas [29].

1.10.13. Esfuerzo a compresión:

$$\sigma_{AB} = \frac{F}{A} \quad (14)$$

$$\sigma_{AB} = \frac{154,28N}{0.000141 \text{ m}^2}$$

$$\sigma_{AB} = 1,094 * 10^6 \text{ N/m}^2$$

Donde:

$$\sigma_{AB} = \text{Esfuerzo de compresión [N/m}^2\text{]}$$

$$F = \text{Fuerza aplicada [N]}$$

$$A = \text{Área [m}^2\text{]}$$

La presión critica es la fuerza máxima que se puede ejercer sin sobrepasar la carga de euler, el módulo de elasticidad se obtuvo de la red, la inercia de la sección 1.10.9, longitud efectiva de la sección 1.10.11 y la carga critica es la máxima carga que soporta una estructura sin perder su estado estable [30].

1.10.14. Presión crítica:

$$P_{cr} = \pi^2 * E * I / L_e^2 \quad (16)$$

$$P_{cr} = \left(\frac{\pi^2 * 2 * 10^{11} \text{ N/m}^2 * 1,3 * 10^{-8} \text{ m}^4}{(0,5)^2} \right)$$

$$P_{cr} == 102,64 \text{ kN}$$

1.10.15. Esfuerzo crítico:

$$\sigma_{cr} = P_{cr} / A \quad (17)$$

$$\sigma_{cr} = 102,64 \text{ kN} / 0.000141 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{cr} = 729,94 * 10^3 \text{ N/m}^2$$

Donde:

P_{cr} = Presión crítica [kN]

E = Módulo de elasticidad [N/m²]

I = Inercia [m⁴]

L_e = Longitud efectiva [m]

σ_{cr} = Esfuerzo crítico [N/m²]

A = Área [m²]

El criterio de Von Mises es un criterio estático aplicado a la columna en un punto en el cual el material no fluirá para ellos es necesario evaluar sus esfuerzos principales obtenidos tanto para eje x como y con ellos obtener el cortante máximo y esfuerzo de Von Mises como un criterio de diseño ante falla elástica [22].

1.10.16. Von Mises:

Esfuerzo en x:

$$\sigma_x = 0 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo en y:

$$\sigma_y = 1,094 * 10^6 \text{ N/m}^2$$

Esfuerzo en z:

$$\sigma_z = 0 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo 1:

$$\sigma_1 = 1,094 * 10^6 \text{ N/m}^2 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo 2

$$\sigma_2 = 0 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo 3

$$\sigma_3 = 0 \text{ Mpa}$$

$$\sigma' = \sqrt{\frac{1}{2}(1,094 * 10^6 - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (0 - 1,094 * 10^6)^2}$$

$$\sigma' = \sqrt{\frac{1}{2}(1,094 * 10^6 - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (0 - 1,094 * 10^6)^2}$$

$$\sigma' = 1,33 * 10^6 \text{ N/m}^2$$

Donde:

$$\sigma_1 = \text{Esfuerzo principal 1 [N/m}^2\text{]}$$

$$\sigma_2 = \text{Esfuerzo principal 2 [N/m}^2\text{]}$$

$$\sigma_3 = \text{Esfuerzo principal 3 [N/m}^2\text{]}$$

$$\sigma' = \text{Esfuerzo de Von Mises [N/m}^2\text{]}$$

El factor de seguridad es un índice de seguridad de un determinado diseño para validar la resistencia mecánica de la viga, el valor de esfuerzo ultimo como el permisible se obtuvo de tablas[23].

1.10.17. Factor de seguridad

$$F.S = \frac{\sigma_u}{\sigma_{per}} \quad (18)$$

$$F.S = \frac{7,29 * 10^8 \text{ N/m}^2}{4,867 * 10^7 \text{ N/m}^2}$$

$$F.S = 15$$

Donde:

$$F_s = \text{Factor de seguridad}$$

$$\sigma_u = \text{Esfuerzo ultimo [N/m}^2\text{]}$$

$$\sigma_{per} = \text{Esfuerzo permisible [N/m}^2\text{]}$$

1.10.18. Análisis de la soldadura:

En la figura 18 es necesario realizar una unión por soldadura entre la cabina y las guías para su traslado tanto al entregar calor a la lámina como cuando está en otro proceso, **Figura 18** en esta junta la unión se da por flexión y la forma de la soldadura a emplearse para el análisis es de filete.

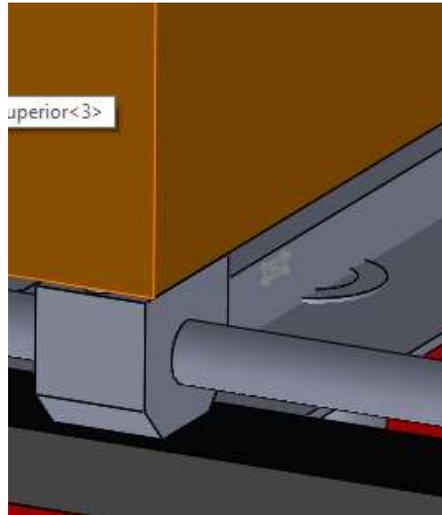


Figura 18. Análisis de la junta de la soldadura

1.10.19. Vista lateral:

En la figura 19 se realizó un esquema donde se vería lateralmente la junta **Figura 19** donde estaría la soldadura.

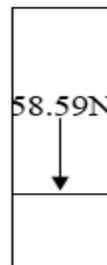


Figura 19. Vista lateral de la estructura

1.10.20. Propiedades flexionantes de la soldadura:

En la figura 20 se calcula las propiedades geométricas de la soldadura a filete **Figura 20**

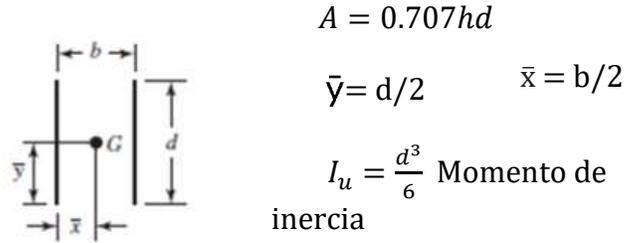


Figura 20. Esquema de la soldadura filete [31]

El área de la garganta es la altura máxima donde se deposita la soldadura que tiene una sección que forma un triángulo debido a la soldadura por filete, para ello se colocó una altura de 0,006 m y un ancho de la cara de 0,045 m de la pieza a soldar, posteriormente para el cortante directo se dividió el peso aplicado en ese punto para el área de la garganta y finalmente para el cortante por flexión sacamos el centroide en y al dividir su ancho de la cara a soldar para dos, por otro lado debemos obtener un centroide, un momento de inercia final y un momento para obtener el cortante doble [31].

1.10.21. Área de la garganta:

$$A_g = 0.707hd \quad (19)$$

$$A_g = 0,707 * (0,006m) * 0,045m$$

$$A_g = 0.0001908 \text{ m}^2$$

1.10.22. Cortante directo:

$$\tau = \frac{V}{A_g} \quad (20)$$

$$\tau = \frac{58.59N}{0.0001908 \text{ m}^2}$$

$$\tau = 3,07 * 10^5 \text{ N/m}^2$$

1.10.23. Cortante por flexión:

$$\bar{y} = d/2 \quad (21)$$

$$\bar{y} = 0.045 \text{ mm}/2$$

$$\bar{y} = 0.0225 \text{ m}$$

$$c = b - \bar{y} \quad (22)$$

$$c = 0.03 - 0.0225$$

$$c = 7.5 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$I_u = \frac{d^3}{6} \quad (23)$$

$$I_u = \frac{(0,045\text{m})^3}{6}$$

$$I_u = 1,518 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$I = 0,707w * I_u \quad (24)$$

$$I = 0,707 * 0,006 \text{ m} * 1,518 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$I = 6,3756 * 10^{-10} \text{ m}^4$$

$$M = F * d \quad (25)$$

$$M = 58.59 \text{ N} * 0.045 \text{ m}$$

$$M = 2,63 \text{ N} * \text{m}$$

$$\tau'' = \frac{Mc}{I} \quad (26)$$

$$\tau'' = \frac{2,63 * 10^6 \text{ N} * \text{m} * 0,0075 \text{ m}}{6,3756 * 10^{-10} \text{ m}^4}$$

$$\tau'' = 3,09 * 10^{13} \text{ N/m}^2$$

Donde:

$A_g = \text{Area de la garganta [m}^2\text{]}$

$h = \text{Altura del deposito de soldadura [m]}$

$d = \text{Cara del área a soldar [m]}$

$\tau = \text{Cortante directo [N/m}^2\text{]}$

$V = \text{Fuerza aplicada [N]}$

$c = \text{centroide [m]}$

$b = \text{ancho entre soldadura de filete [m]}$

$\bar{y} = \text{centroide en y [m]}$

$I_u =$ Momento ultimo de inercia [m^3]

$w =$ espesor del material base [m]

$M =$ *momento* [$N * m$]

$F =$ Fuerza aplicada [N]

$I =$ Inercia [m^4]

$\tau'' =$ Cortante doble [N/m^2]

1.11. DISEÑO TÉRMICO:

En la figura 21 Se observa como incide la radiación en el bosquejo de un horno **Figura 21** en el cual se basó para realizar el análisis térmico

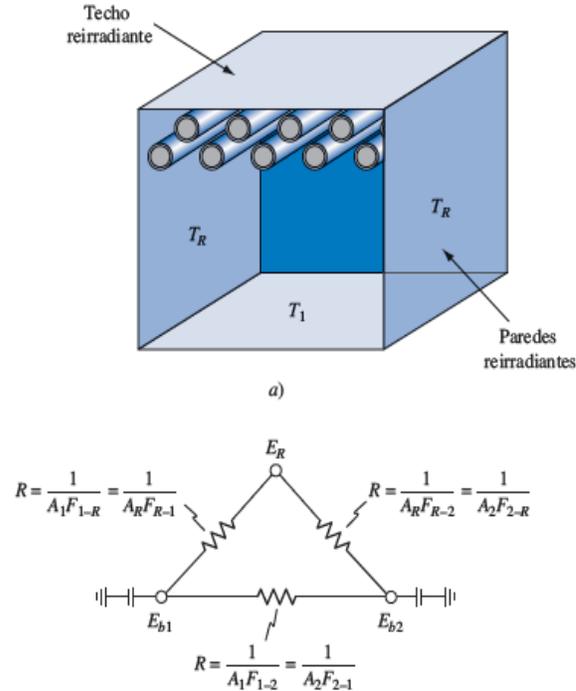


Figura 21. Bosquejo del horno [32]

En la figura 22 podemos observar el esquema de la cabina del horno **Figura 22** que tendrá la máquina de termoformado en formato A4

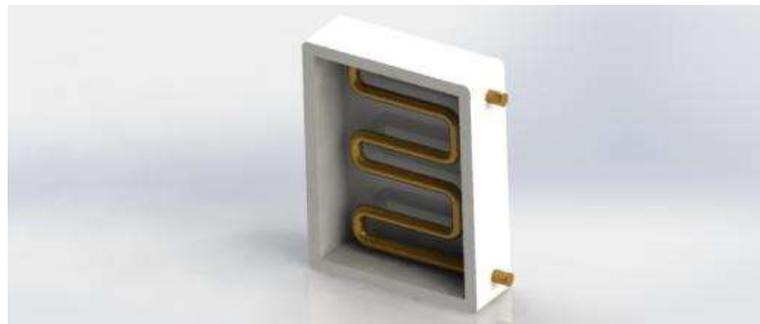


Figura 22. Esquema de la cabina

1.11.1. Parámetros

Temperatura exterior: La pared exterior del horno a la cual puede llegar es de 50°C para un laboratorio según la norma INEN-ISO 13732-1.

-Temperatura ambiente: 20°C según la norma ISO 15189

En la tabla 8 se calcula las masas multiplicando el volumen de la lámina A4 **Tabla 8** con la densidad del Pet a diferentes espesores

Tabla 8. Masas del Pet

Masa Pet	
Densidad 1380 [kg/m^3]	
Área 0,21[m]x0,297[m]	
Espesores (m)	Masa [Kg]
$9 * 10^{-4}$	0,077
$7,5 * 10^{-4}$	0,064
$2,5 * 10^{-4}$	0,021

En la tabla 9 tenemos la estructura y las temperaturas **Tabla 9** que tienen los diferentes materiales

Tabla 9. Temperaturas distintos materiales [13]

Material	Cristalinidad (%)	Temperatura de transición vítrea ($^{\circ}C$)	Temperatura de termoformado ($^{\circ}C$)	Temperatura de degradación ($^{\circ}C$)
Polietileno 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	15	80-85	135-175	200-300
Policarbonato	Baja	145-150	180-230	420-620

1.11.2. Matriz de decisión para aislante del horno

En la tabla 10 se realizó una matriz de decisión del aislante que tendrá el horno quedando con mayor puntuación **Tabla 10** la fibra de vidrio.

Tabla 10. Matriz de decisión aislante del horno

	Puntaje	Lana de roca	Yeso	Fibra de vidrio
Costo	10	5	10	7
Facilidad de compra	20	10	20	20
Conductividad	20	20	15	20
Montaje en el horno	20	19	10	15
	70	54	55	62

En la Tabla 11 se observa las propiedades termofísicas del aire con el que trabaja la lámina para obtener con ellas **Tabla 11** el coeficiente de convección

Tabla 11. Propiedades termofísicas del aire [33].

Tabla A.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure							
T (C)	ρ (kg/m ³)	Cp (KJ/Kg*C)	$\mu \cdot 10^7$ (N*s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$\kappa \cdot 10^3$ (W/m*C)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
-173,15	3,5562	1,032	71,1	2,00	9,34	2,54	0,786
-123,15	2,3364	1,012	103,4	4,426	13,8	5,84	0,758
-73,15	1,7458	1,007	132,5	7,59	18,1	10,3	0,737
-23,15	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,72
26,85	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
80,00	0,995	1,009	208,2	20,92	30	29,9	0,7
126,85	0,8711	1,014	230,1	26,41	33,8	38,3	0,69
176,85	0,774	1,021	250,7	32,39	37,3	47,2	0,686
226,85	0,6964	1,03	270,1	38,79	40,7	56,7	0,684
276,85	0,6329	1,04	288,4	45,57	43,9	66,7	0,683

En esta sección obtendremos el calor por convección mediante ecuaciones de transferencia de calor:

El calor de convección se obtuvo para las placas horizontales del horno con el cálculo de la temperatura promedio de la lámina, propiedades termofísicas del aire, longitud característica, número de Rayleigh, número de Nusselt y coeficiente por convección [33].

1.11.3. Coeficiente de convección

- 1) Temperatura promedio lámina plástica

$$T_{prom} = \frac{(20) + (140)}{2} = 80^\circ \quad (27)$$

Donde:

T_{prom} = Temperatura promedio [°C]

140°C = Temperatura de la lámina

20°C = Temperatura ambiente

- 2) Propiedades termofísicas

$$Pr = 0,700$$

$$k_{aire} = 30 * 10^{-3} \text{ [W/mC]}$$

$$\nu = 20.92 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

$$\alpha = 29,9 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Donde:

Pr = Número de Prand

k = Conductividad térmica [W/mC]

ν = viscosidad dinámica [m²/s]

α = difusividad térmica [m²/s]

- 3) Cálculo de longitud característica para una placa horizontal

$$L = \frac{A_s}{P} = \frac{0,21 \times 0,297}{2 \times 0,21 + 2 \times 0,297} = 0,0615 \text{ m} \quad (28)$$

(29)

$$Ra_D = \frac{(9,8)\left(\frac{1}{80}\right)(140 - 20)(0,0615)^3}{(20,92 \times 10^{-6})(29,9 \times 10^{-6})}$$

$$Ra_D = 5,46 * 10^6$$

Donde:

L = Longitud característica [m]

A_s = Área superficial [m^2]

P = Perímetro de la placa [m]

g = gravedad (9,8) [m/s^2]

β = inverso temperatura final $\left(\frac{1}{80}\right)$ [$^{\circ}C$]

140 $^{\circ}C$ = Temperatura de la lámina

20 $^{\circ}C$ = Temperatura ambiente

L = Longitud característica (0,0615)[m]

α = difusividad termica ($20,92 \times 10^{-6}$)[m^2/s]

ν = viscosidad cinemática ($29,9 \times 10^{-6}$) [m^2/s]

4) Cálculo de Nusselt

$$\overline{Nu}_L = 0,54 * Ra^{\frac{1}{4}} \quad Ra_D \leq 10^{12} \quad (30)$$

$$\overline{Nu}_L = 0,54 * (5,46 * 10^6)^{\frac{1}{4}}$$

$$\overline{Nu}_L = 26,10$$

Donde:

Nu_L = Número de Nusselt

Ra = Número de Rayleigh

5) Cálculo de convección

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

$$26,10 = \frac{h_{conv}(0,0615)}{30 \times 10^{-3}}$$

$$h_{conv} = 12,73 \left[\frac{W}{m^2C} \right]$$

Donde:

(31)

$$h = \text{coeficiente de conveccion} \left[\frac{W}{m^2C} \right]$$

$$k = \text{conductividad termica} \left[\frac{W}{mC} \right]$$

1.11.4. Calor por convección

$$Q = h * A * (T_f - T_o) \quad (32)$$

$$Q = (12,73)(0,21 * 0,297) * (140 - 20)$$

$$Q = 95,27[\text{Watt}]$$

Donde:

$$h = \text{coeficiente de convección} \left[\frac{W}{m C} \right]$$

$$A = \text{Área de la lámina} [m^2]$$

$$T_f = \text{Temperatura final} [^{\circ}C]$$

$$T_o = \text{Temperatura ambiente} [^{\circ}C]$$

En la figura 23 se puede observar un factor de forma utilizado en un plano **Figura 23** observando la irradiancia de un tubo hacia un plano:

1.11.5. Temperatura de la resistencia

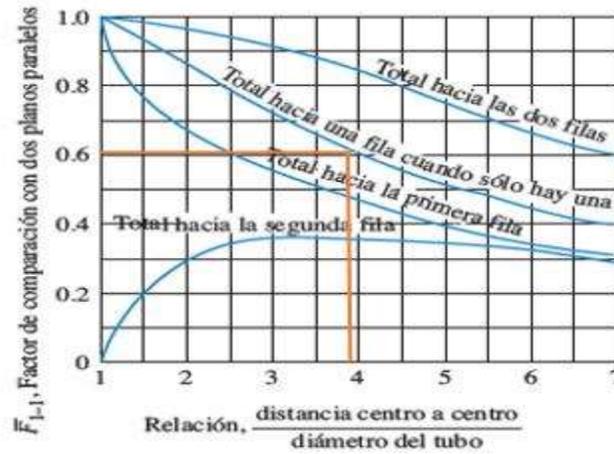


Figura 23. Relación de factor de forma en un plano [32]

$$\frac{S}{D} = \frac{50}{13} = 3,85$$

Donde:

S=Distancia entre fibras [m]

D=Diámetro [m]

Por lo que el factor de forma $F_{21} \approx 0,60$, Además que $A_1=A_2/ F_{21}= F_{12}$

En la figura 24 se puede observar un factor de forma utilizado en un plano **Figura 24** observando la irradiancia de un tubo hacia una fila infinita de tubos.

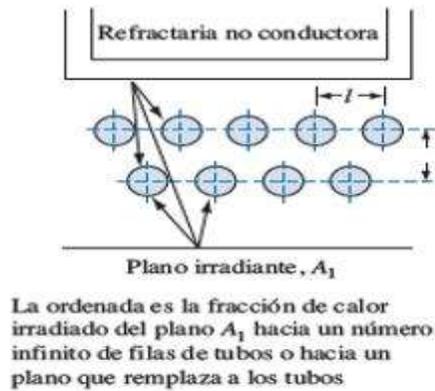


Figura 24. Refracción en tubos [32]

Se analiza el calor por radiación de la lámina de PET donde este fenómeno puede incidir sobre una superficie y sus alrededores [34]

$$\begin{aligned}
 E_{entra} - E_{sale} &= 0 & (34) \\
 Q_{rad} - Q_{conv} &= 0 \\
 Q_{rad} &= Q_{conv} \\
 \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{A_1 * \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{A_1 * \epsilon_2}} &= 65.71 \\
 \frac{5,67 * 10^{-8}(T_2^4 - 140^4)}{\frac{1 - 0,9}{(0,06237) * (0,9)} + \frac{1}{(0,06237)(0,6)} + \frac{1 - 0,6}{(0,06237) * 0,6}} &= 95,27 \\
 T_2 &= 217,85^\circ C
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\sigma = \text{Constante Stefan Boltzmann} \left[\frac{W}{m^2 C^4} \right]$$

$$T_2 = \text{Temperatura de la resistencia} [^\circ C]$$

$$T_1 = \text{Temperatura de lámina} [^\circ C]$$

$$\epsilon = \text{emisividad del material Pet/Pvc}$$

$$A = \text{Área de la lamina} [m^2]$$

En la tabla 12 para sacar el coeficiente de convección se debe obtener las siguientes propiedades **Tabla 12** termofísicas:

Tabla 12. Propiedades termofísicas [33]

Tabla A.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure							
T (C)	ρ (kg/m ³)	Cp (KJ/Kg*C)	$\mu \cdot 10^7$ (N*s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$\kappa \cdot 10^3$ (W/m*C)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
-173,15	3,5562	1,032	71,1	2,00	9,34	2,54	0,786
-123,15	2,3364	1,012	103,4	4,426	13,8	5,84	0,758
-73,15	1,7458	1,007	132,5	7,59	18,1	10,3	0,737
-23,15	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,72
26,85	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
80,00	0,995	1,009	208,2	20,92	30	29,9	0,7
126,85	0,8711	1,014	230,1	26,41	33,8	38,3	0,69
176,85	0,774	1,021	250,7	32,39	37,3	47,2	0,686
226,85	0,6964	1,03	270,1	38,79	40,7	56,7	0,684
276,85	0,6329	1,04	288,4	45,57	43,9	66,7	0,683

El calor de convección se obtuvo para las placas verticales del horno con el cálculo de la temperatura promedio de la lámina, propiedades termofísicas del aire, longitud característica, número de Raleigh, número de Nusselt y coeficiente por convección [33]

1.11.6. Coeficiente de convección

Se obtiene el coeficiente por convección:

- 6) Temperatura promedio lamina plástico

$$T_{\text{prom}} = \frac{(20) + (50)}{2} = 35 \text{ °C}$$

- 7) Propiedades termofísicas

$$\text{Pr} = 0,705$$

$$k_{\text{aire}} = 26.89 \times 10^{-3} [\text{W/mC}]$$

$$\nu = 16.69 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\alpha = 23.68 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$$

8) Cálculo de longitud característica para una placa vertical

$$L = \frac{A_s}{P} = \frac{0,21 \times 0,05}{2 * 0,21 + 2 * 0,05} = 0,020$$

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu \alpha}$$

$$Ra_D = \frac{(9,8)\left(\frac{1}{35}\right)(50 - 20)(0,020)^3}{(16,69 \times 10^{-6})(23,68 \times 10^{-6})}$$

$$Ra_D = 1,97 * 10^7$$

9) Cálculo de Nusselt

$$\overline{Nu}_L = 0,54 * Ra_D^{\frac{1}{4}} \quad Ra_D \leq 10^{12}$$

$$\overline{Nu}_L = 0,54 * (1,97 * 10^7)^{\frac{1}{4}}$$

$$\overline{Nu}_L = 35,98$$

10) Cálculo de convección

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

$$35,98 = \frac{h_{conv}(0,0615)}{26,89 * 10^{-3}}$$

$$h_{conv} = 15,73 \left[\frac{W}{m^2C} \right]$$

1.11.7. Calor paredes del horno

En la figura 25 se analiza la pared lateral del horno considerando que la temperatura del horno debe mantenerse a 140°C **Figura 25** por lo cual se realiza el análisis por resistencia térmica [35]

-Pared 0,05 m*0,297m

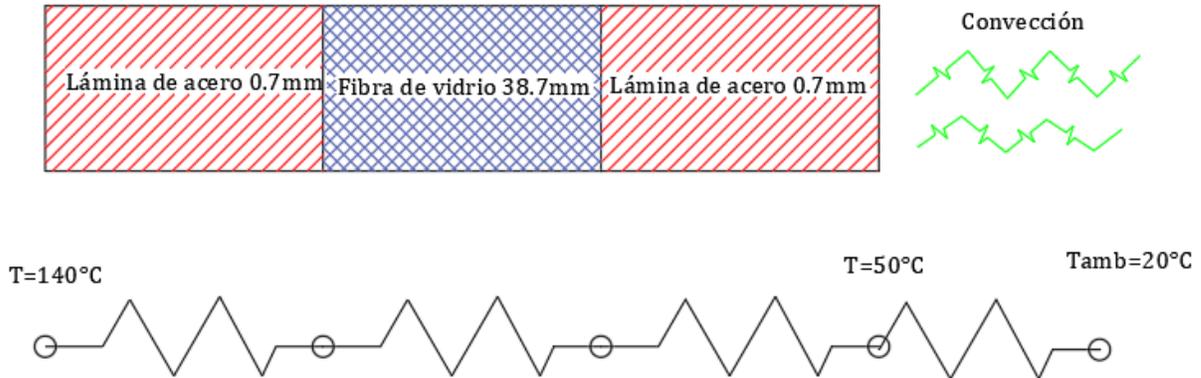


Figura 25. Análisis de calor pared lateral

$$Q_{\text{pared A}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_{\text{lamina acero 0.7}}}{K_{\text{acero}} A_{\text{lamina de acero}}} + \frac{L_{\text{fibra de vidrio}}}{K_{\text{fibra}} A_{\text{fibra}}} + \frac{L_{\text{lamina acero 0.7}}}{K_{\text{acero}} A_{\text{lamina de acero}}} + \frac{1}{h_{\text{ext}} * A}} \quad (35)$$

$$Q_{\text{pared A}} = \frac{140 - 50}{\frac{7 * 10^{-4}}{50 * (0,05 * 0,297)} + \frac{38,7 * 10^{-3}}{0,05 * (0,05 * 0,297)} + \frac{7 * 10^{-4}}{50 * (0,05 * 0,297)} + \frac{1}{9,925 * (0,05 * 0,297)}}$$

$$Q_{\text{pared}} = 1,52 [\text{Watt}]$$

Donde:

$T_1 =$ Temperatura de la lámina [°C]

$T_2 =$ Temperatura exterior de la pared del horno [°C]

$L = \text{Longitud de aislante [m]}$

$k = \text{conductividad termica } \left[\frac{W}{mC}\right]$

$A = \text{Área del material [m}^2\text{]}$

$h_{ext} = \text{Coeficiente de trasmisión supeficial } \left[\frac{W}{m^2C}\right]$

$Q = \text{Calor de la pared [W]}$

Pared 0,05m*0,21m

En la figura 26 se analiza la pared frontal del horno considerando que la temperatura del horno debe mantenerse a 140 °C **Figura 26** por lo que se realiza un análisis por resistencia [35] térmica

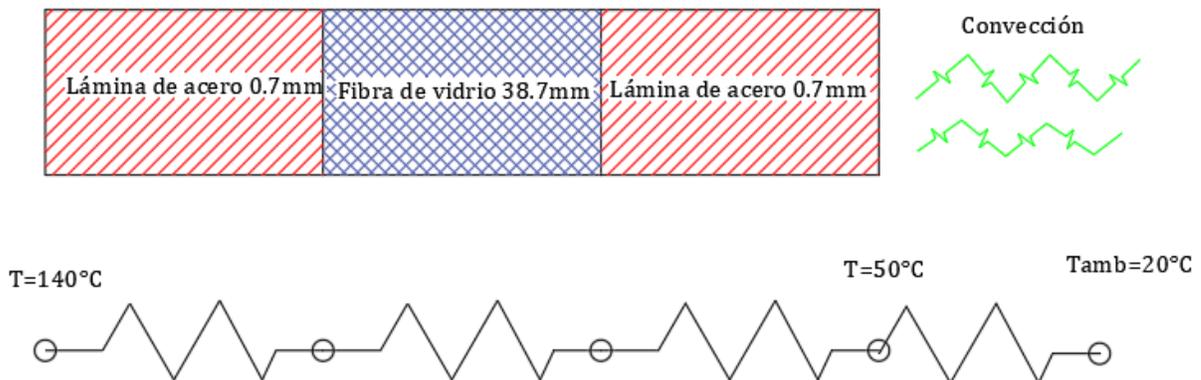


Figura 26. Análisis de la pared frontal

$$Q_{pared B} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_{lamina\ acero\ 0.7}}{K_{acero} A_{lamina\ de\ acero}} + \frac{L_{fibra\ de\ vidrio}}{K_{fibra} A_{fibra}} + \frac{L_{lamina\ acero\ 0.7}}{K_{acero} A_{lamina\ de\ acero}} + \frac{1}{h_{ext} * A}}$$

$Q_{pared B}$

$$= \frac{140 - 50}{\frac{7 * 10^{-4}}{50 * (0,05 * 0,21)} + \frac{38,7 * 10^{-3}}{0,05 * (0,05 * 0,21)} + \frac{7 * 10^{-4}}{50 * (0,05 * 0,21)} + \frac{1}{9,925 * 0,05 * 0,21}}$$

$$Q_{pared B} = 1,08[Watt]$$

Donde:

$T_1 =$ Temperatura de la lámina [°C]

$T_2 =$ Temperatura exterior de la pared del horno [°C]

$L =$ Longitud de aislante [m]

$k =$ conductividad termica $[\frac{W}{mC}]$

$A =$ Área del material [m²]

$h_{ext} =$ Coeficiente de trasmisión supeficial $[\frac{W}{m^2C}]$

$Q =$ Calor de la pared [W]

-Pared 0,21m*0,297m

En la figura 27 se analiza la pared superior del horno considerando que la temperatura del horno debe mantenerse a 140 °C **Figura 27** por lo que se realiza un análisis por resistenci^[35] térmica

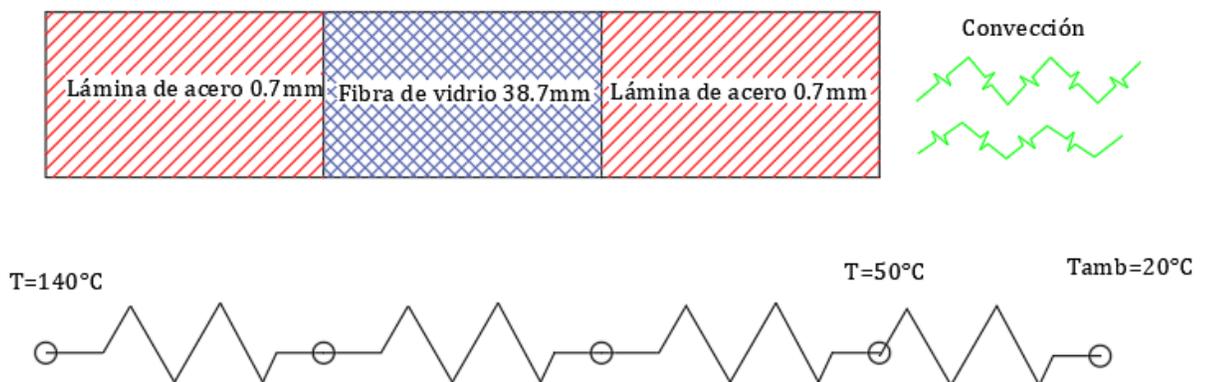


Figura 27. Análisis de la pared superior del horno

$$Q_{pared A} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_{lamina\ acero\ 0.7}}{K_{acero} A_{lamina\ de\ acero}} + \frac{L_{fibra\ de\ vidrio}}{K_{fibra} A_{fibra}} + \frac{L_{lamina\ acero\ 0.7}}{K_{acero} A_{lamina\ de\ acero}} + \frac{1}{h_{ext} * A}}$$

$Q_{\text{pared A}}$

$$= \frac{249,46 - 50}{\frac{7 * 10^{-4}}{50 * (0,21 * 0,297)} + \frac{38,7 * 10^{-3}}{0,05 * (0,21 * 0,297)} + \frac{7 * 10^{-4}}{50 * (0,21 * 0,297)} + \frac{1}{9,925 * (0,21 * 0,297)}}$$

$$Q_{\text{pared}} = 14,22[\text{Watt}]$$

Donde:

$T_1 = \text{Temperatura de la lámina } [^{\circ}\text{C}]$

$T_2 = \text{Temperatura exterior de la pared del horno } [^{\circ}\text{C}]$

$L = \text{Longitud de aislante } [\text{m}]$

$k = \text{conductividad termica } \left[\frac{\text{W}}{\text{mC}}\right]$

$A = \text{Área del material } [\text{m}^2]$

$h_{\text{ext}} = \text{Coeficiente de trasmisión supeficial } \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}\right]$

$Q = \text{Calor de la pared } [\text{W}]$

Obtenemos la potencia de la resistencia eléctrica que nos da las condiciones de trabajo del sistema de control [32]

1.11.8. Potencia de la resistencia eléctrica

$$\text{Potencia} = Q_{\text{rad}} + Q_{\text{perdidas}} \quad (36)$$

$$\text{Potencia} = Q_{\text{rad}} + 2 * Q_{\text{parde A}} + 2 * Q_{\text{parde B}} + Q_{\text{superior}}$$

$$\text{Potencia} = 65,71\text{W} + 2 * (1,52) + 2 * (1,08) + 14.22$$

$$\text{Potencia} = 85.13[\text{Watt}]$$

Donde:

$P = \text{Potencia de la resistencia electrica [W]}$

$Q_{rad} = \text{Calor por radiación [W]}$

$Q_{parde A} = \text{Calor de la pared lateral [W]}$

$Q_{parde B} = \text{Calor de la pared frontal [W]}$

$Q_{superior} = \text{Calor de la pared superior [W]}$

Obtenemos el dato de el tiempo de termoformado como de succión para la maquina termoformadora [36].

1.11.9. Tiempo de termoformado

$$Q_{Lamina} = \frac{m_{lamina-0,25 \text{ mm}} * C_p(T_f - T_o)}{\Delta t} \quad (37)$$

$$65,71 = \frac{(0,021) * (1200) * (167.5 - 20)}{\Delta t}$$

$$\Delta t = 57,04[s] = 1[\text{min}]$$

1.11.10. Tiempo de succión:

$$Q_{entrada} = Q_{salida}$$

$$65,71 = \frac{(0,021) * (1200) * (140 - 20)}{\Delta t}$$

$$\Delta t = 46,02 \text{ s}$$

Donde:

$m = \text{masa de la lámina (0,25mm) [kg]}$

$\text{Potencia de la resistencia electrica} = [W]$

$Q_{rad} = \text{Calor por radiación [W]}$

$Q_{parde A} = \text{Calor de la pared lateral [W]}$

$Q_{parde B} = \text{Calor de la pared frontal [W]}$

$Q_{superior} = \text{Calor de la pared superior [W]}$

1.12. DISEÑO NEUMÁTICO:

En la tabla 13 se realizó una matriz de decisión del tipo de bomba de vacío a emplearse en el diseño neumático ganado **Tabla 13** con mayor puntuación la bomba de paletas por su disponibilidad en el mercado y su capacidad de succión.

Tabla 13.Selección de bombas

	Puntaje	pistón	diafragma	paletas	rotor excéntrico
Costo	10	7	8	10	5
Disponibilidad en el mercado	20	5	10	10	6
Utilidad	20	7	10	10	7
Capacidad de succión	20	8	3	13	15
Total	70	27	31	43	33

En la tabla 14 se analiza el tipo de manguera a emplearse en las tuberías que unen a la bomba de vacío y la tolva siendo la con mayor puntuación la manguera de ¼ de in **Tabla 14** por su facilidad de compra y fácil acople.

Tabla 14. Selección de mangueras

	Puntaje	¼ pulgadas	½ pulgada	1 pulgada
Costos	5	5	4	4
Daños por manipulación	10	10	10	10
Facilidad de encontrar en el mercado	10	8	8	10
Facilidad de acoplar en bombas	10	8	7	10
Facilidad de encontrar accesorios	10	9	8	10
Total	45	37	37	45

1.12.1. Selección de Bomba de vacío

En la figura 28 se observa la mesa de vacío donde se va a colocar el molde **Figura 28** para obtener la pieza deseada con termoformado [37]

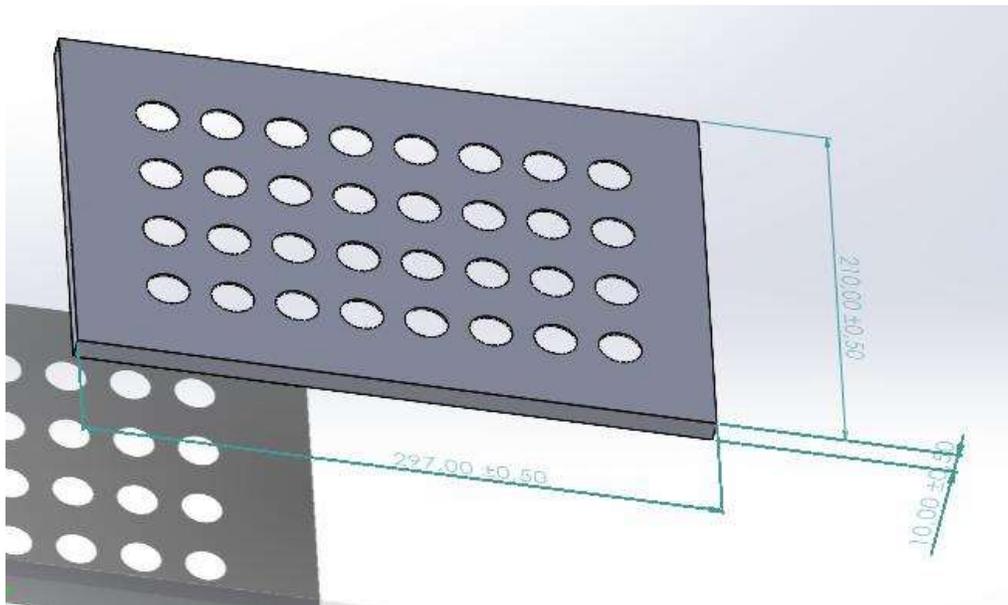


Figura 28. Mesa de vacío

El volumen de la mesa de vacío fue realizado mediante un prediseño en SolidWorks

1.12.2. Sacamos volumen de la mesa de vacío

(38)

$$V_{\text{mesa}} = LWH$$

$$V_{\text{mesa}} = (0,21) * (0,297) * (0,01)$$

$$V_{\text{mesa}} = 0,0006237[m^3]$$

Donde:

V = Volúmen de la mesa [m^3]

L = Longitud [m]

W = Ancho [m]

H = Altura [m]

1.12.3. Volumen de la tolva

En la figura 29 se observa el volumen de la tolva **Figura 29** realizada mediante el software SolidWorks [38]

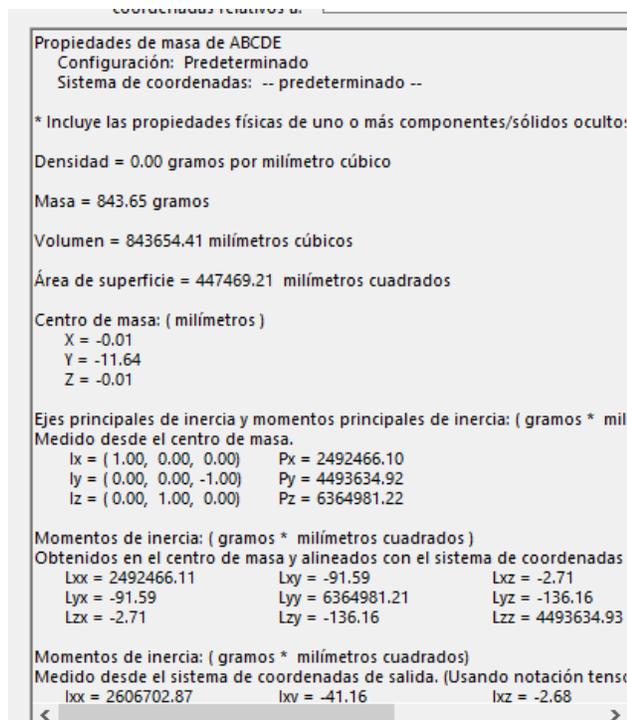


Figura 29. Volúmen de la tolva

$$V_{\text{tolva}} = 0.0008436[m^3]$$

1.12.4. Volumen de cámara para objetos recubrir con termoformado

En la figura 30 se observa el diagrama de la cámara de termoformado decido para obtener la potencia total de la bomba **Figura 30** que se necesita para el vaciado [39]

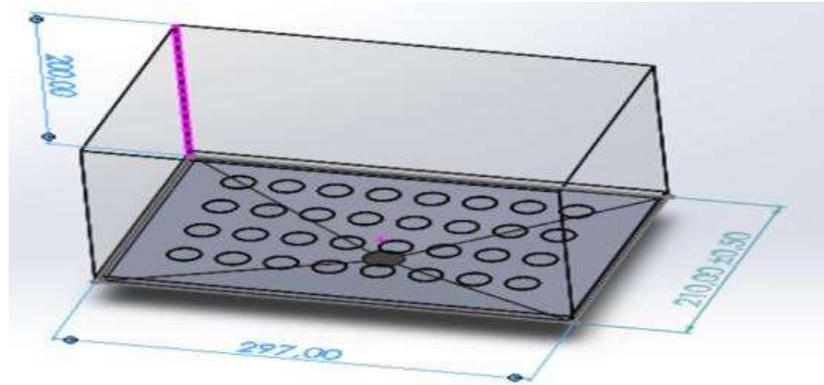


Figura 30. Volúmen de la cámara de termoformado

$$V_{camara} = (l) * (b) * (h) \quad (39)$$

$$V_{camara} = (0,21) * (0,297) * (0,2)$$

$$V_{camara} = 0,012[m^3]$$

Donde:

$l = longitud [m]$

$b = ancho [m]$

$h = altura [m]$

El volumen total se lo realizo de todo el sistema de formado y el flujo volumétrico con un tiempo de 7 s [40]

1.12.5. Volumen total

$$V_{total} = V_{mesa} + V_{tolva} + V_{camara} + V_{manguera} \quad (40)$$

$$V_{total} = 0,0006237 + 0,00008436 + 0,012 + \frac{\pi(0,00635)^2 * (2)}{4}$$

$$V_{total} = 0,013[m^3]$$

1.12.6. Flujo volumétrico requerido

$$C = \frac{V_{total}}{t} \quad (41)$$

Se fija un valor de 7 segundos para la aspiración

$$C = \frac{(0,013)}{7}$$

$$C = 1,85 * 10^{-3} [m^3/s]$$

1.12.7. Cálculo de velocidad perdidas por presión en tuberías

En la figura 31 se observa un esquema general de conexiones de la bomba hacia la tolva de recepción que con un proceso de vaciado permite dar la forma del molde deseado **Figura 31** y de igual manera nos enseña los cálculos del caudal en función del área.

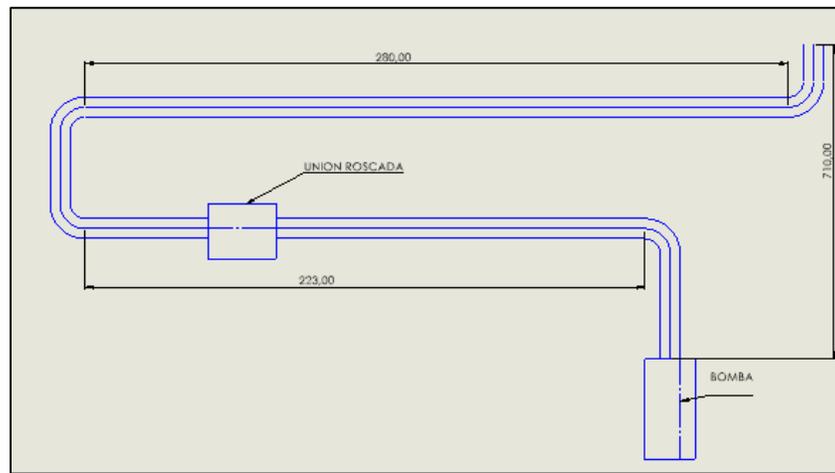


Figura 31. Esquema de conexiones

$$1,85 * 10^{-3} \left[\frac{m^3}{s} \right] / A_{manguera} \quad (42)$$

$$1,85 * 10^{-3} \left[\frac{m^3}{s} \right] / \left(\frac{\pi (0.00635)^2}{4} \right) [m^2]$$

$$U_{manguera} = 58,41 [m/s]$$

1.12.8. Perdidas por fricción en tuberías

En la tabla 15 se observa las propiedades del aire a 1 atm de presión para poder obtener el número de Reynolds **Tabla 15** y las caídas de presión en la tubería [41]

Para obtener las pérdidas en las tuberías primeramente obtenemos el número de Reynolds que dependerá de la velocidad del flujo en la manguera, el diámetro dada por la matriz de decisión y la viscosidad cinemática de la tabla 15

Tabla 15. Propiedades termo físicas

Propiedades del aire a 1 atm de presión							
Temperatura T °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor especifico Cp J/kg.C	Conductividad térmica K W/m.C	Difusividad térmica α m ² /s	Viscosidad dinámica μ kg/m.s	Viscosidad cinemática v m ² /s	Número de Prandtl Pr
-150	2,866	983	0,01171	4.158 x10 ⁻⁶	8.636x10 ⁻⁶	3.1013x10 ⁻⁶	0,7246
-100	2,038	966	0,01582	8,036 x10 ⁻⁶	1.189x10 ⁻⁶	5,837x10 ⁻⁶	0,7263
-50	1,582	999	0,01979	1.252x10 ⁻⁵	1.474x10 ⁻⁵	9.319x10 ⁻⁶	0,744
-40	1,514	1002	0,02057	1.356x10 ⁻⁵	1.527x10 ⁻⁵	1.008x10 ⁻⁵	0,7436
-30	1,451	1004	0,02134	1.465x10 ⁻⁵	1.579x10 ⁻⁵	1.087x10 ⁻⁵	0,7425
-20	1,394	1005	0,02211	1.578x10 ⁻⁵	1.630x10 ⁻⁵	1.169x10 ⁻⁵	0,7408
-10	1,341	1006	0,02288	1.696x10 ⁻⁵	1.680x10 ⁻⁵	1.252x10 ⁻⁵	0,7387
0	1,292	1006	0,02364	1.818x10 ⁻⁵	1.719x10 ⁻⁵	1.338x10 ⁻⁵	0,7362
5	1,269	1006	0,02401	1.880x10 ⁻⁵	1.754x10 ⁻⁵	1.382x10 ⁻⁵	0,735
10	1,246	1006	0,02439	1.944x10 ⁻⁵	1.778x10 ⁻⁵	1.426x10 ⁻⁵	0,7336
15	1,225	1007	0,02476	2.009x10 ⁻⁵	1.802x10 ⁻⁵	1.470x10 ⁻⁵	0,7323
20	1,204	1007	0,02514	2.074x10 ⁻⁵	1.825x10 ⁻⁵	1.516x10 ⁻⁵	0,7309
25	1,184	1007	0,02551	2.141x10 ⁻⁵	1.849x10 ⁻⁵	1.562x10 ⁻⁵	0,7296

$$Re = \frac{uD_{hidraulico}}{v} \quad (43)$$

$$Re = \frac{58,41 * (0.00635)}{1,562 * 10^{-5}}$$

$$Re = 23745.42$$

Donde:

$$u = \text{viscosidad cinemática} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$$

$$D_h = \text{diámetro hidráulico} [m]$$

$$v = \text{viscosidad dinámica} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$Re = \text{Número de reynolds}$$

Para obtener el coeficiente de fricción debemos sacar la rugosidad relativa del material obtenidas del libro de cengel, de igual manera se fijó una longitud horizontal, densidad de la tabla 14, se colocó el diámetro de la tubería en base a una matriz de decisión y por último se obtuvo la caída de presión en nuestro sistema [41]

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -18 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

Si $\varepsilon = 0$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -18 \log \left(\frac{6,9}{23745,42} \right) \quad (44)$$

$$f = 0,000246$$

Donde:

f = factor de fricción

Re = Número de Reynolds

$\frac{\varepsilon}{d}$ = Rugosidad relativa

1.12.9. Caída de presión

$$-\Delta P = f * L_{horizontal} * v^2 * \frac{\rho}{2D} \quad (45)$$

$$-\Delta P = (0,000246) * (0,503) * (58,41)^2 * \left(\frac{1,204}{2 * (0.00635)} \right)$$

$$-\Delta P = 40,0022 [Pa]$$

Donde:

f = factor de fricción

ΔP = Caída de presión [Pa]

$L_{horizontal}$ = Longitud horizontal [m]

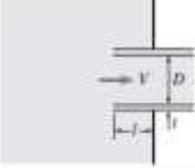
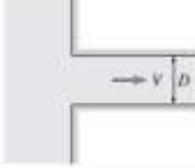
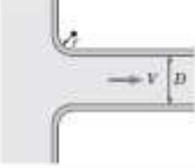
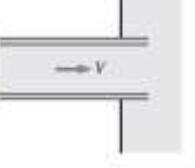
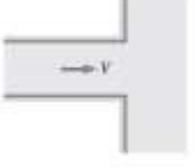
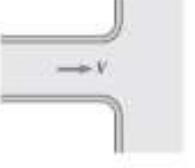
v = viscosidad cinematica $\left[\frac{m}{s} \right]$

D = diámetro de la manguera [m]

1.12.10. *Perdidas de carga total*

En la figura 32 se puede observar el tipo de accesorios que tiene las tuberías en nuestro caso tiene una sección ligeramente redondeada **Figura 32** [41]

TABLA 8-4
 Coeficientes de pérdida K_L de varios accesorios de tubería para flujo turbulento (para usar en la relación $h_L = K_L V^2 / (2g)$, donde V es la velocidad promedio en la tubería que contiene el accesorio)*

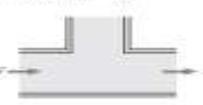
<p><i>Entrada de la tubería</i> Reentrante: $K_L = 0.80$ ($t \ll D \text{ e } l \approx 0.1D$)</p> 	<p><i>De borde agudo:</i> $K_L = 0.50$</p> 	<p><i>Redondeada</i> ($r/D > 0.2$): $K_L = 0.03$ Ligeramente redondeada ($r/D = 0.1$): $K_L = 0.12$ (véase figura B-36)</p> 
<p><i>Salida de la tubería</i> Reentrante: $K_L = \alpha$</p> 	<p><i>De borde agudo:</i> $K_L = \alpha$</p> 	<p><i>Redondeada:</i> $K_L = \alpha$</p> 

Nota: el factor de corrección de energía cinética es $\alpha = 2$ para flujo laminar totalmente desarrollado, y $\alpha = 1$ para flujo turbulento totalmente desarrollado.

Figura 32. Perdidas en accesorios

En la figura 33 se puede observar los coeficientes de pérdida en codos y conexiones como en tipo T, **Figura 33** en nuestro caso poseemos algunas secciones con codo por lo que nuestra constante a emplear será de 0,3[41]

TABLA 8-4 (CONCLUSIÓN)

<p><i>Codos y ramificaciones</i> Codo suave de 90°: Embrizado: $K_L = 0.3$ Roscado: $K_L = 0.9$</p> 	<p><i>Codo esquinado de 90°</i> (sin alabes directores): $K_L = 1.1$</p> 	<p><i>Codo esquinado de 90°</i> (con alabes directores): $K_L = 0.2$</p> 	<p><i>Codo roscado de 45°:</i> $K_L = 0.4$</p> 
<p><i>Codo de retorno de 180°:</i> Embrizado: $K_L = 0.2$ Roscado: $K_L = 1.5$</p> 	<p><i>Conexión en T (flujo deriv.):</i> Embrizado: $K_L = 1.0$ Roscado: $K_L = 2.0$</p> 	<p><i>Conexión en T (flujo en línea):</i> Embrizado: $K_L = 0.2$ Roscado: $K_L = 0.9$</p> 	<p><i>Unión roscada:</i> $K_L = 0.08$</p> 

Válvulas:
 Válvula de globo, totalmente abierta: $K_L = 10$
 Válvula de ángulo, totalmente abierta: $K_L = 5$
 Válvula de bola, totalmente abierta: $K_L = 0.05$

Válvula de compuerta, totalmente abierta: $K_L = 0.2$
 } cerrada: $K_L = 0.3$
 } cerrada: $K_L = 2.1$

Figura 33. Perdidas en codos

En el caso de pérdidas totales consideramos 4 codos con una constante de 0.3, una unión roscada con una constante de 0,08 y una entrada redondeada con una constante de 0,03 entregándonos las pérdidas de energía del sistema; por otro lado, se utilizó la ecuación de Bernoulli donde únicamente tenemos la altura 2 fijada, la pérdida de energía obtenida anteriormente, la velocidad del flujo en la manguera y la constante de la gravedad. Por último, para la potencia de la bomba se usa el caudal de la sección 1.12.6, la densidad de la tabla 15, la constante de la gravedad, la altura de la bomba y la eficiencia de la bomba[41]

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \sum K_L &= 4_{\text{codos}} + 1_{\text{UnionRoscada}} + 1_{\text{EntradaRedondeada}} = 4 * 0.3 + 0.08 + 0.03 \\ &= 1.31 \end{aligned}$$

$$h_L = \left((0,000246) \frac{0,503}{0,00635} + (1,31) \right) \frac{(58,41)^2}{2(9,81)}$$

$$h_L = 231,42[m]$$

Donde:

f = factor de fricción

$\frac{L}{D}$ = $\frac{\text{Longitud}}{\text{diámetro}}$

k_l = Constante de perdidas

1.12.11. Altura de la bomba

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{bomba}} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbina}} + h_L \quad (47)$$

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_{\text{bomba}} = z_2 + h_L$$

$$h_{\text{bomba}} = z_2 + h_L - \frac{V_1^2}{2g}$$

$$h_{\text{bomba}} = 0,71 + 231,42 - \frac{58,41^2}{2 * 9,8}$$

$$h_{\text{bomba}} = 58,06[m]$$

Donde:

$h_{bomba} = \text{Altura de la bomba [m]}$

$z_2 = \text{Altura [m]}$

$h_l = \text{perdida de energía del sistema [m]}$

$V_1 = \text{velocidad del flujo en la manguera } [\frac{m}{s}]$

$g = \text{gravedad } [\frac{m}{s^2}]$

1.12.12. Potencia Bomba

$$W = \frac{C * \rho * g * h_{bomba}}{n_{bomba}} \quad (48)$$

$$W = \frac{(1,85 * 10^{-3}) * 1,204 * 9,81 * (58,06)}{0,70}$$

$$W = 1,81[\text{Watt}]$$

La potencia de la bomba es de 1,81 [Watt] considerando todas las pérdidas que se van a tener, se debe seleccionar siempre una bomba superior para el vaciado, en este caso en particular se considerara una bomba de 10 [Watt]

Donde:

$c = \text{caudal } [m^3/s]$

$\rho = \text{densidad } [\frac{kg}{m^3}]$

$h_{bomba} = \text{Altura de la bomba [m]}$

$n = \text{eficiencia}$

$g = \text{gravedad } [\frac{m}{s^2}]$

1.13. DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO:

En la tabla 16 se realizó una matriz de decisión del tipo de controlador a usarse para que ejecute todo el circuito siendo la de mayor puntaje **Tabla 16** el Arduino Mega por su disponibilidad en el mercado y facilidad de programación

Tabla 16. Matriz de decisión ejecutador del programa

	Puntaje	Arduino Mega	PLC	Arduino Nano	Protoboard
Costo	10	9	7	5	5
Disponibilidad en el mercado	20	15	12	15	15
Utilidad	20	12	16	10	10
Facilidad de programación	20	15	10	15	10
Versatilidad	30	25	23	20	15

En la figura 34 se muestra el esquema eléctrico de las alimentaciones de la bomba, resistente y como son conectadas a fuente de voltaje para generar energía **Figura 34** y adicional nos muestra del paro de emergencia que corta todo el circuito

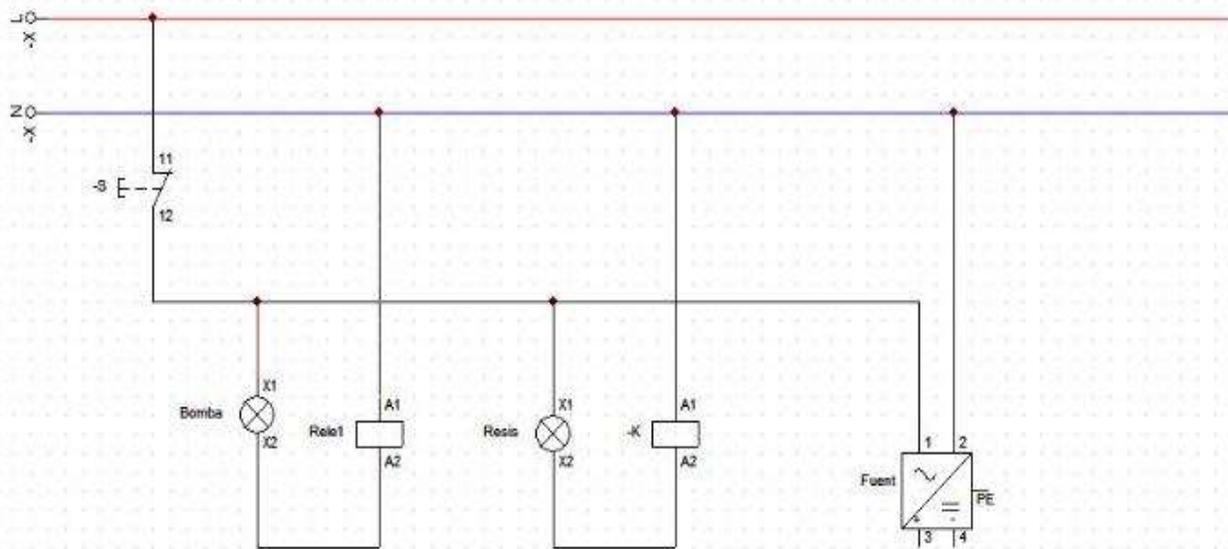


Figura 34. Esquema eléctrico

En la figura 35 se representa el circuito electrónico que mediante una fuente de alimentación conectada al Arduino Mega inicio el sistema, enciende la resistencia y entrega de temperaturas de la lámina, inicia el proceso de vaciado nos da el tiempo de espera **Figura 35** para finalizar este proceso y reinicia el sistema para realizar un proceso total nuevamente.

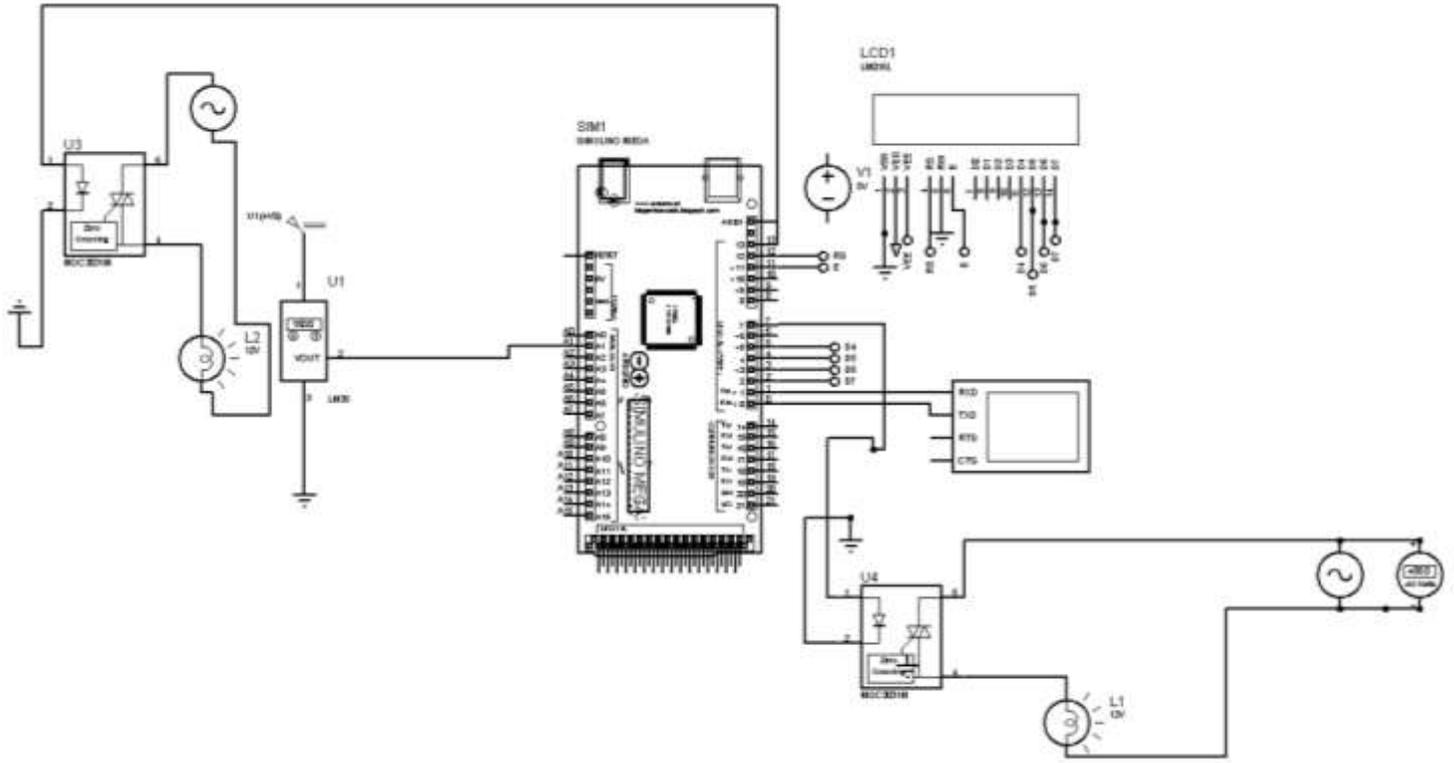


Figura 35. Esquema electrónico

1.13.1. Elementos sistema de control:

En la figura 36 se muestra un interruptor el cual va a permitir el paso o cierre de corriente **Figura 36** a nuestro circuito.



Figura 36. Interruptor On/Off [43]

En la figura 37 se muestra un relé de estado sólido que brinda una señal de control para el encendido y apagado de la resistencia eléctrica **Figura 37** y encendido del sistema.



Figura 37. Relé de estado sólido [44]

En la figura 38 observamos el paro de emergencia que es el que detiene todo el circuito en funcionamiento **Figura 38**.



Figura 38. Paro de emergencia [45]

En la figura 39 se muestra el Arduino el cual nos permite realizar las operaciones de todo el proceso eléctrico **Figura 39** y electrónico.



Figura 39. Arduino [46]

En la figura 40 se muestra un Display que nos permitirá mostrar los datos programados como las temperaturas **Figura 40** de la lámina tiempos de vaciado.



Figura 40. Display [47]

1.14. Condiciones de Borde

En la tabla 17 se muestra las condiciones de borde de nuestro sistema fundamental para el cálculo **Tabla 17** de la maquina termoformadora.

Tabla 17. *Condiciones de Borde*

CONDICIONES DE BORDE			
Diseño	Descripción	Resultados	Observaciones
Mecánico	Viga Principal	Se consideró una viga simplemente apoyada con una carga distribuida de 390,69 N/m en un tramo de 0,3 m	Se consideró la viga en equilibrio estático
	Columna	Se consideró un apoyo empotrado y otro libre con una fuerza de 58,61 N	Se considera en equilibrio estático
	Soldadura	Se consideró como punto más crítico la soldadura entre la cabina y la guía del horno considerar unir la junta por una soldadura por filete con un área de garganta de 0,00019m ²	Es necesario analizar la soldadura más crítica en caso de fallos externos
Térmico	Horno	Parámetros iniciales según fuentes: Temperatura exterior: 50 C Temperatura ambiente: 20 C Geometría de la lámina: 0,21x0,297 m	Es necesario tener parámetros iniciales para realizar un prediseño de la máquina
Neumático	Sistema en general	Con el caudal obtenido de 0.00185 m ³ /s genera unas pérdidas por fricción de 231,42 [m] con una altura de la bomba de 58 m entregándonos una potencia de 2,12 Watts	Al obtener un valor pequeño de caudal no es necesaria una gran bomba de vacío
Eléctrico	Sistema en general	La temperatura máxima de la lámina es 150 C, el tiempo de espera en el proceso de vacío es de 46 s	Posee un control con un cierto grado de automatización

1.15. Análisis de resultados:

En la tabla 18 se realiza una comparativa de los datos obtenidos en la sección 1.10 vs lo simulados **Tabla 18** de la sección 1.16.1

1.15.1. Resultados diseño y simulación

Tabla 18. Comparativo diseño vs Simulación

	Componentes de análisis	Diseño mecánico	Simulación
Vigas	Esfuerzo de Von Mises	$13,93 * 10^6 \text{N/m}^2$	$13,8 * 10^6 \text{N/m}^2$
	Factor de seguridad	15	15
	Deflexión máxima	0,0025 m	0.0000628m

En la tabla 19 se realizar una comparativa de los datos obtenidos de la sección 1.10 vs los simulados **Tabla 19** de la sección 1.16.1

Tabla 19. Comparativa diseño vs Simulación

	Componentes de análisis	Diseño mecánico	Simulación
Columnas	Esfuerzo a compresión	$1,094 * 10^6 \text{N/m}^2$	$1,0942 * 10^6 \text{N/m}^2$
	Presión crítica	102,64 kN	101,75 kN
	Tensión de Von Mises	$1,33 * 10^6 \text{N/m}^2$	$1,2729 * 10^6 \text{N/m}^2$
	Factor de seguridad	15	15

En la tabla 20 se realiza una comparativa de los datos obtenidos de la sección 1.11.5 vs los datos simulados **Tabla 20** de la sección 1.16.2

Tabla 20. Comparativa diseño vs Simulación térmica

Componentes de análisis	Diseño térmico	Simulación
Temperatura de la lámina	140 ° C	143 ° C

En la tabla 21 se realizó una descripción de análisis de resultados de los cálculos previos del sistema de formado **Tabla 21** para obtener la capacidad adecuada de nuestra bomba de vacío.

Tabla 21.Análisis de resultados neumática

Análisis de resultados sistema neumático

Se obtiene en base a distintos cálculos de pérdidas de fricción, caídas de presión, caudales, velocidad la potencia necesaria para abastecer la máquina termoformadora; para ello es necesario dimensionar la mesa de vacío, tolva, cámara de termoformado denominadas como ventosa y de esta manera poder emplearlas en un circuito neumático entregando resultados del comportamiento del circuito cuando es sometido a un caudal. La bomba que se selecciona es de 20 Watts, los cálculos realizados en el diseño neumático para saber la potencia nos entregan un resultado de 10,56 watts y siempre hay que tomar en cuenta el inmediato superior.

La caída de presión es de 6,68 Pa, hay que considerar siempre que todo sistema sea neumático o hidráulico no será ideal por lo cual se hace esta consideración.

En la tabla 22 se realizó la descripción del análisis de resultados del circuito que se implementó para el funcionamiento **Tabla 22** de la máquina termoformadora.

Tabla 22.Análisis de resultados sistema eléctrico y electrónico

Análisis de resultados sistema eléctrico y electrónico

Mediante un circuito electrónico con diferentes elementos de control nos permitirá observar las distintas funciones del horno cuando es colocado un material pet/pvc para termoformado, ejecutando la programación mediante la plataforma Arduino IDE, simulando y entregándonos resultados de medición de temperaturas, control del proceso de vaciado, control de tiempos de espera y reseteo del proceso.

La programación que se tiene se la puede observar en el anexo 1, la cual consta de la librería liquidcrystal.h, en la cual hay que definir los pines de Arduino Mega ocupados que serán 12, 11, 5, 4, 3 y 2 siendo entradas digitales y nos permitirá plasmar en el lcd. La termocupla se conectará al Arduino mediante la entrada analógica 1 la misma que estará conectada con su respectivo acondicionador que será el LM35. El relé de estado sólido que prenderá y apagará la resistencia estará conectado al pin digital 13 y por último el otro de relé de estado sólido 2 que prenderá y apagará la bomba de succión estará conectado a la entrada digital 7.

1.16. SIMULACIONES:

1.16.1. Simulación mecánica:

En la figura 41 se observa la deformación máxima que puede alcanzar la viga **Figura 41** al aplicarse 117,21 N

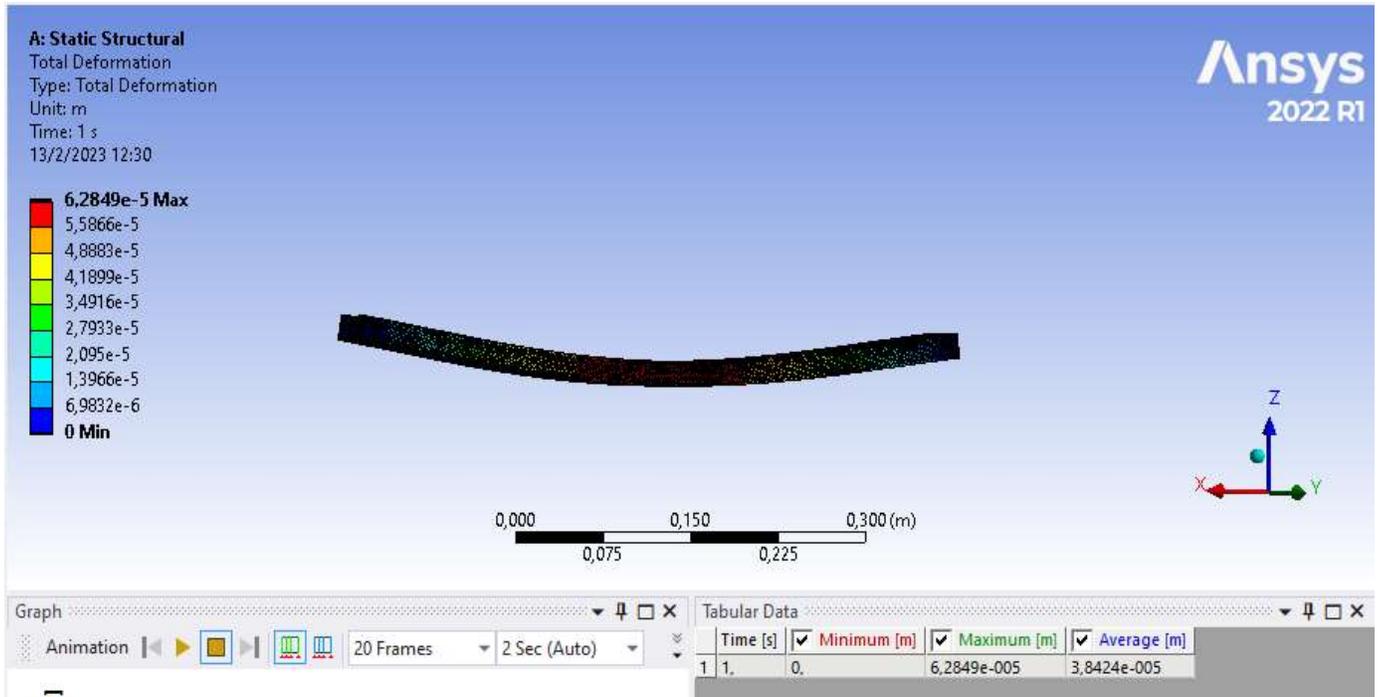


Figura 41. Deformación máxima

En la figura 42 se observa el máximo esfuerzo de Von Mises indicador de diseño para el acero como material dúctil **Figura 42**

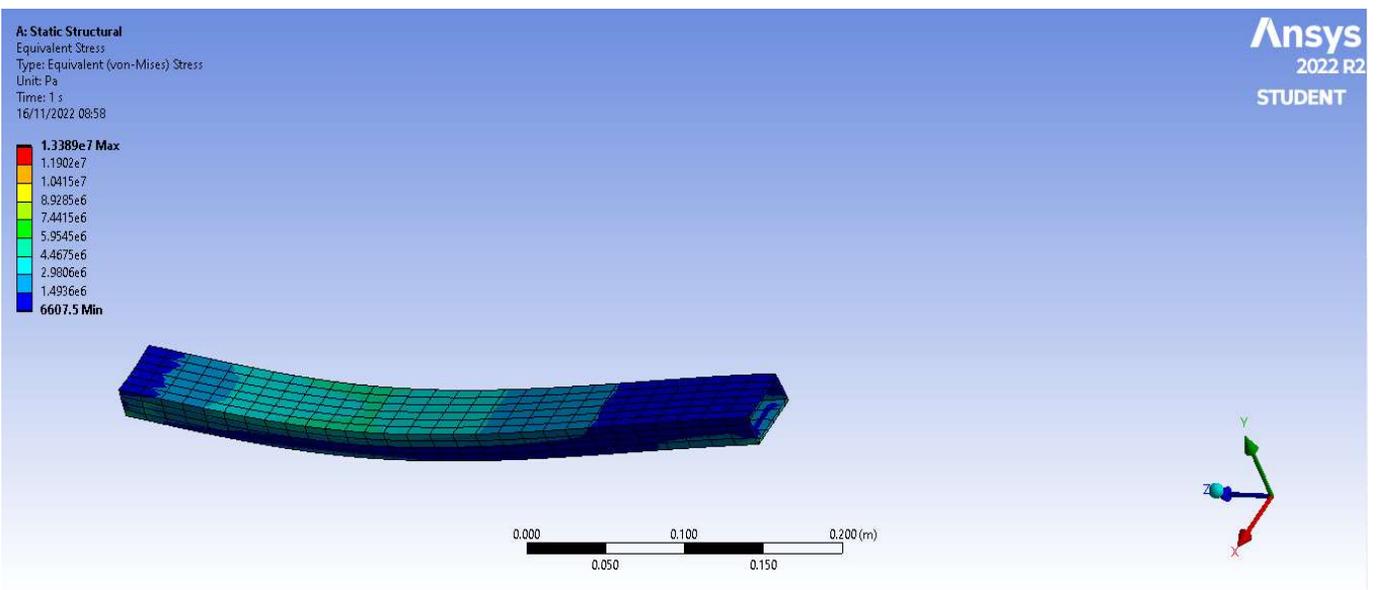


Figura 42. Simulación esfuerzo de Von Mises

En la figura 43 se observar el factor de seguridad con el que trabaja nuestra viga con un máximo de 15 reduciendo el riesgo de falla en la viga **Figura 43** al ser un factor grande.

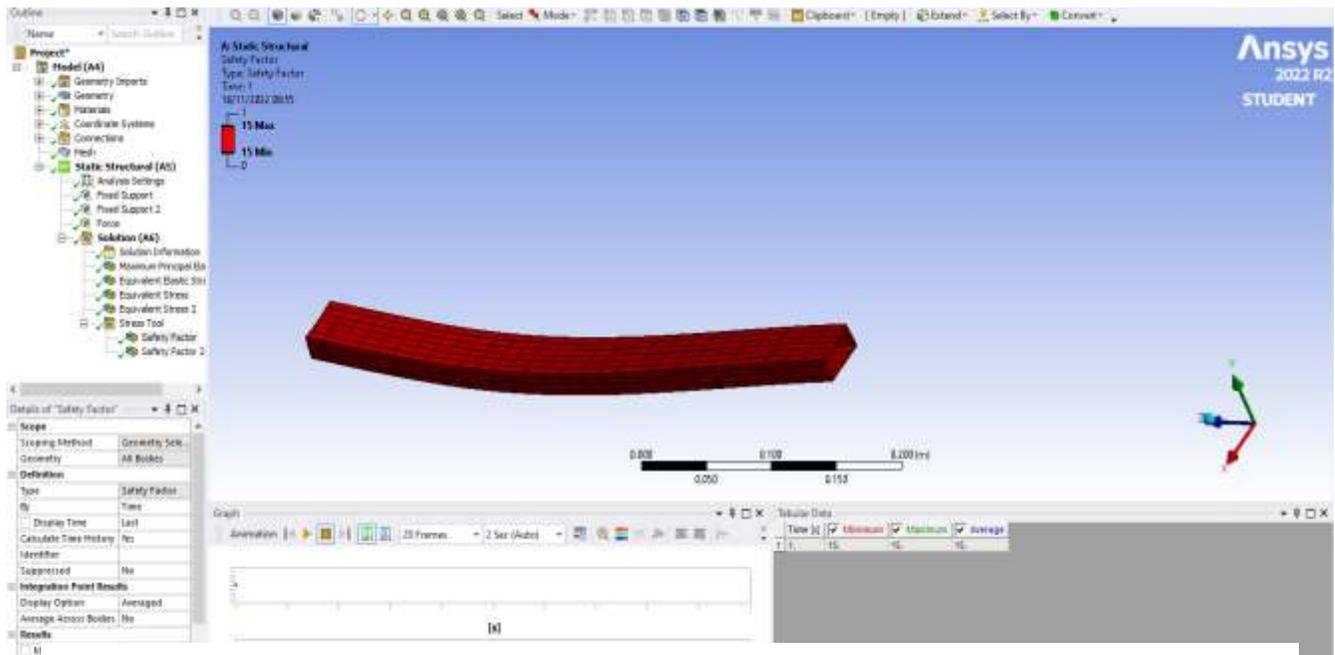


Figura 43. Análisis factor de seguridad

En la figura 44 se observa el esfuerzo a compresión en una columna al aplicarse 117, 21 N esfuerzo principal analizado para cualquier diseño **Figura 44** para ver la estabilidad de la estructura.

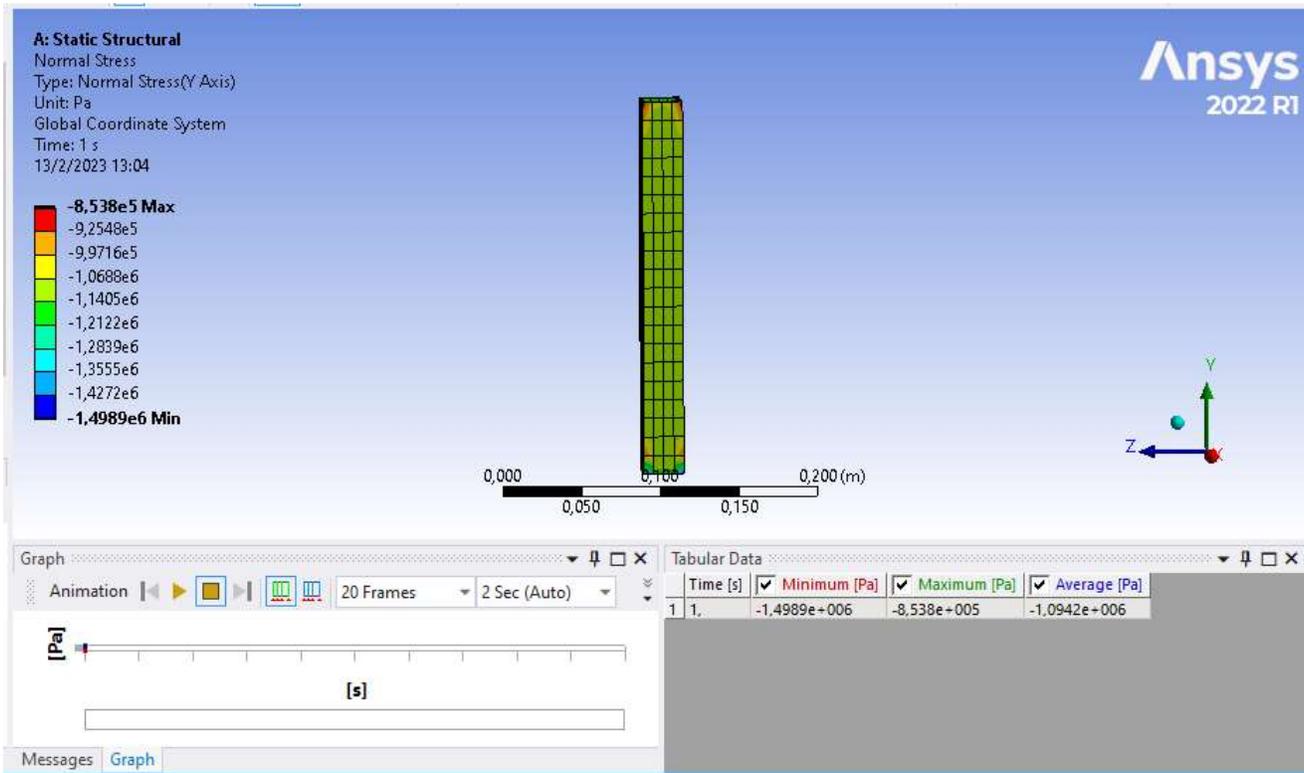


Figura 44. Análisis esfuerzo a compresión

En la figura 45 se muestra la presión crítica de una columna que es la máxima presión que se puede aplicar sin que pierda estabilidad **Figura 45**

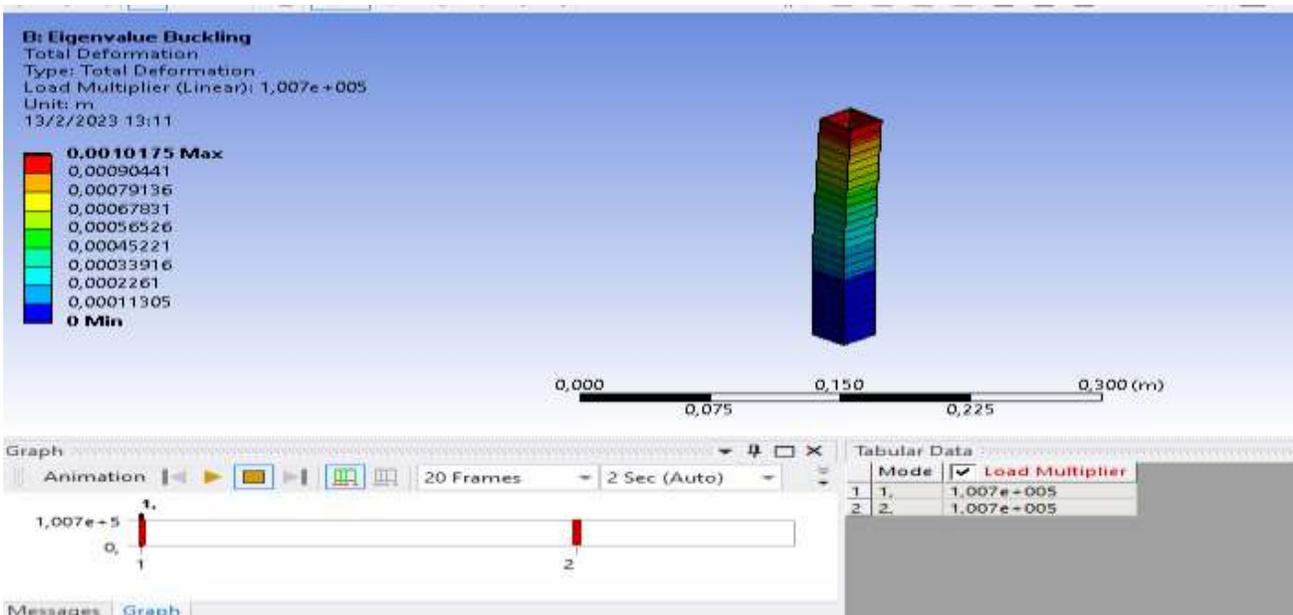


Figura 45. Análisis de la presión crítica de la columna

En la figura 46 se observa la deflexión máxima que tiene la columna antes de pandearse
Figura 46

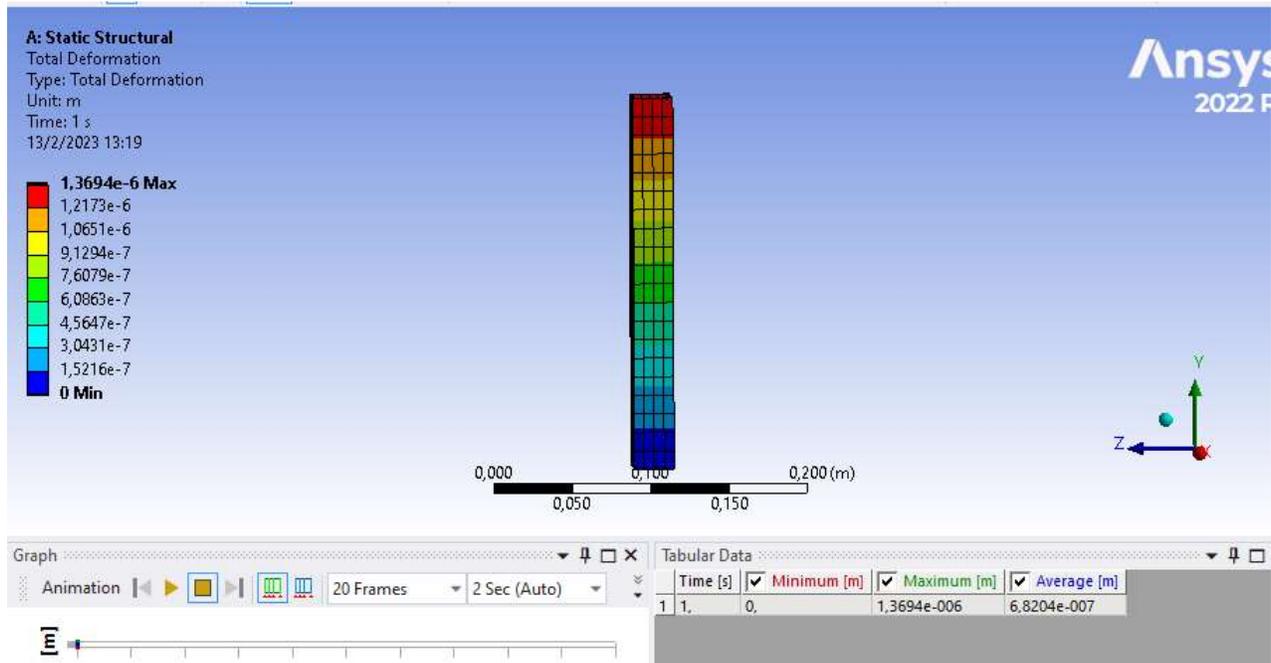


Figura 46. Análisis deflexión máxima

En la figura 47 se observa el esfuerzo de Von Mises criterio que nos permite ver el comportamiento del material
Figura 47

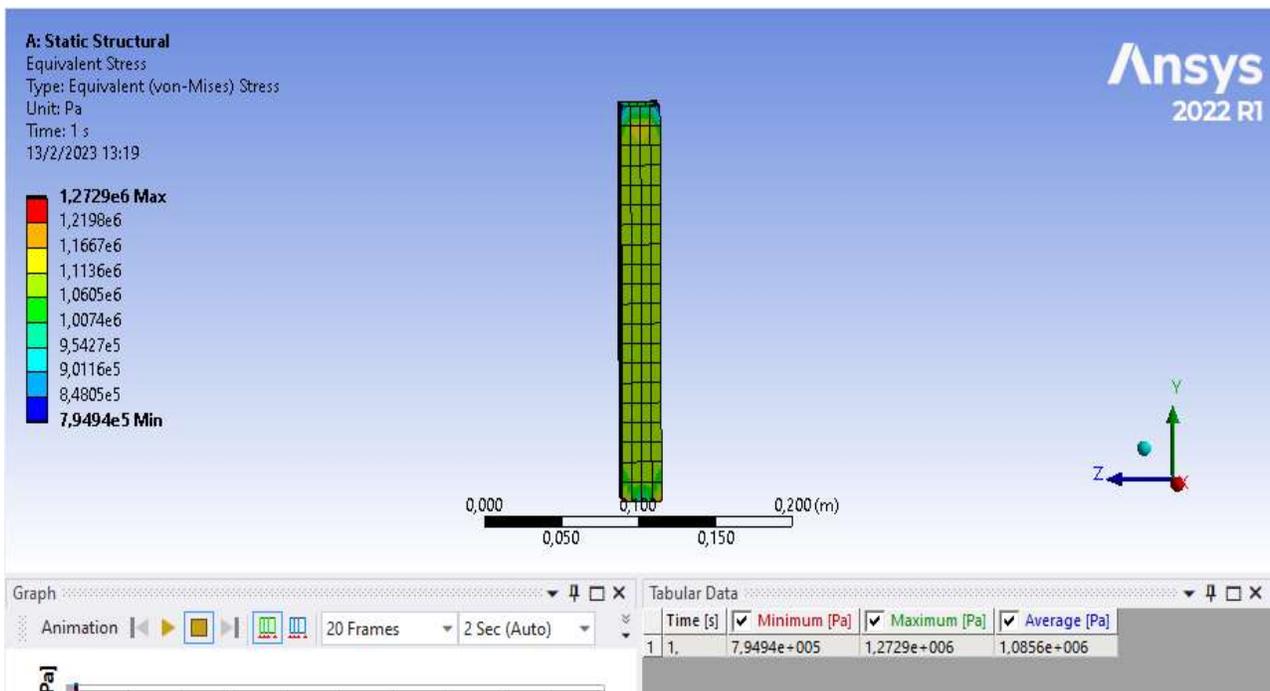


Figura 47. Esfuerzo de Von Mises

En la figura 48 se observa el factor de seguridad con el que trabaja nuestra columna con un máximo de 15 reduciendo el riesgo de falla en la viga **Figura 48** al ser un factor grande

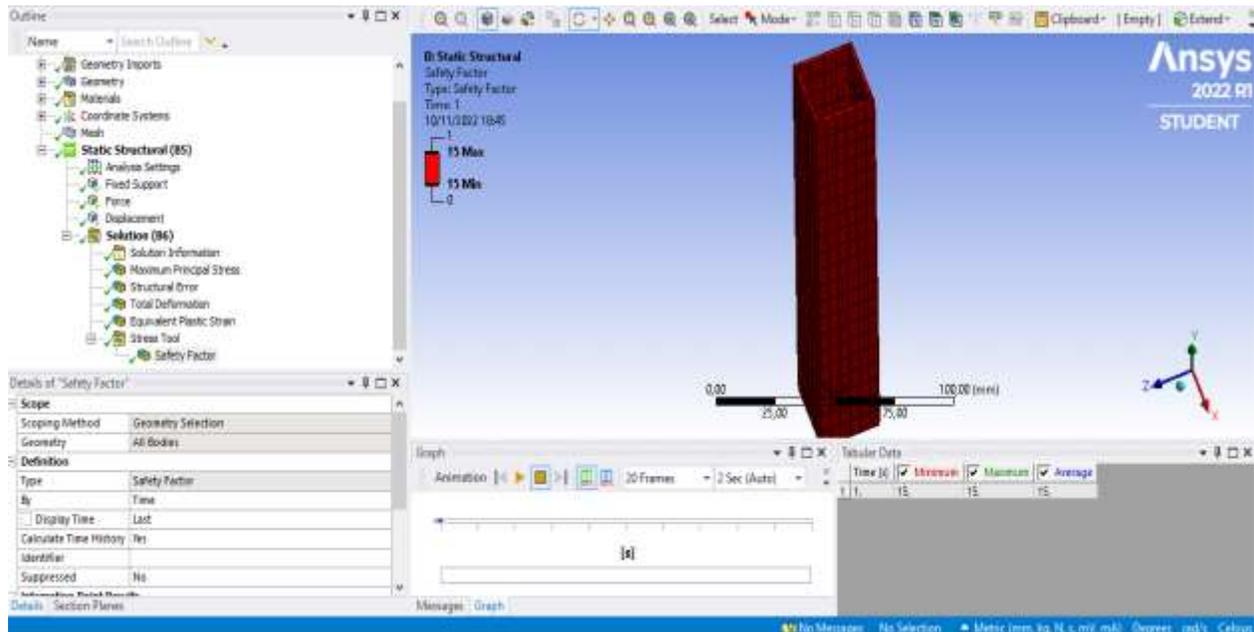


Figura 48. Factor de seguridad

1.16.2. Simulación térmica:

En la figura 49 se observa las temperaturas que presenta en la parte superior del horno **Figura 49** que tiene 83 grados centígrados.

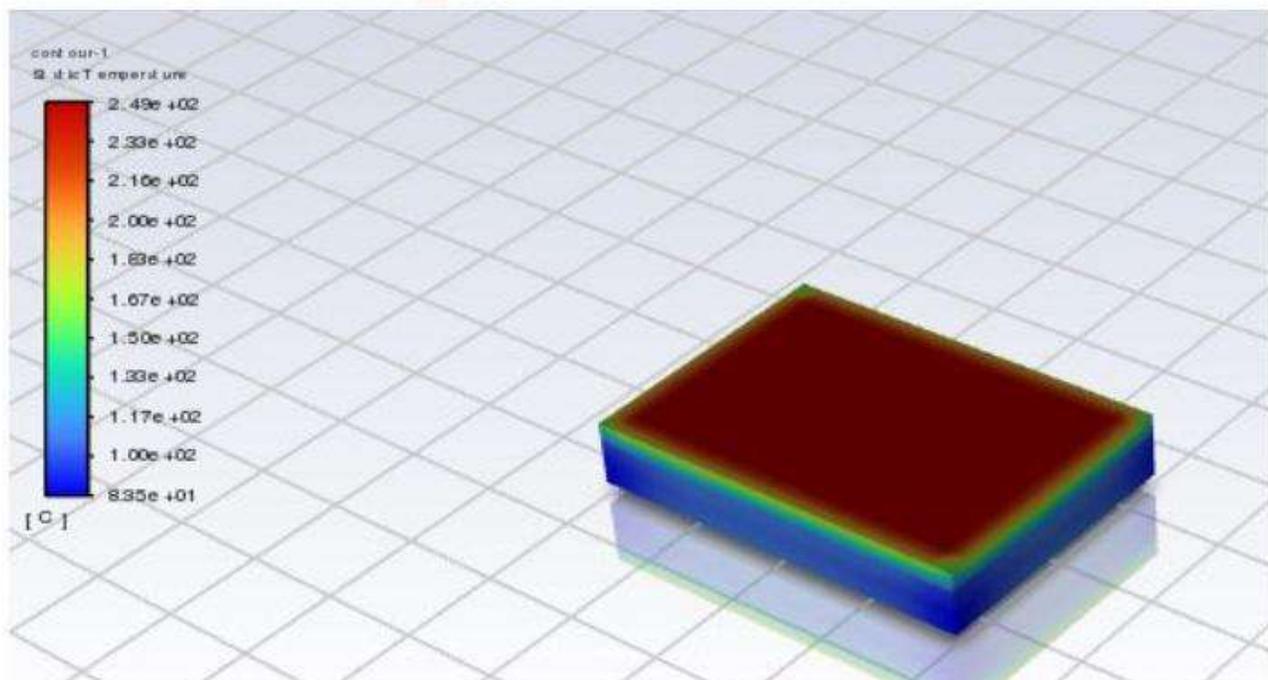


Figura 49. Análisis de la parte superior del horno

En la figura 50 se observa las temperaturas alrededor del horno que varían desde los 83.5 en la parte superior del horno y entre 100 y 150 grados **Figura 50** las paredes laterales del horno.

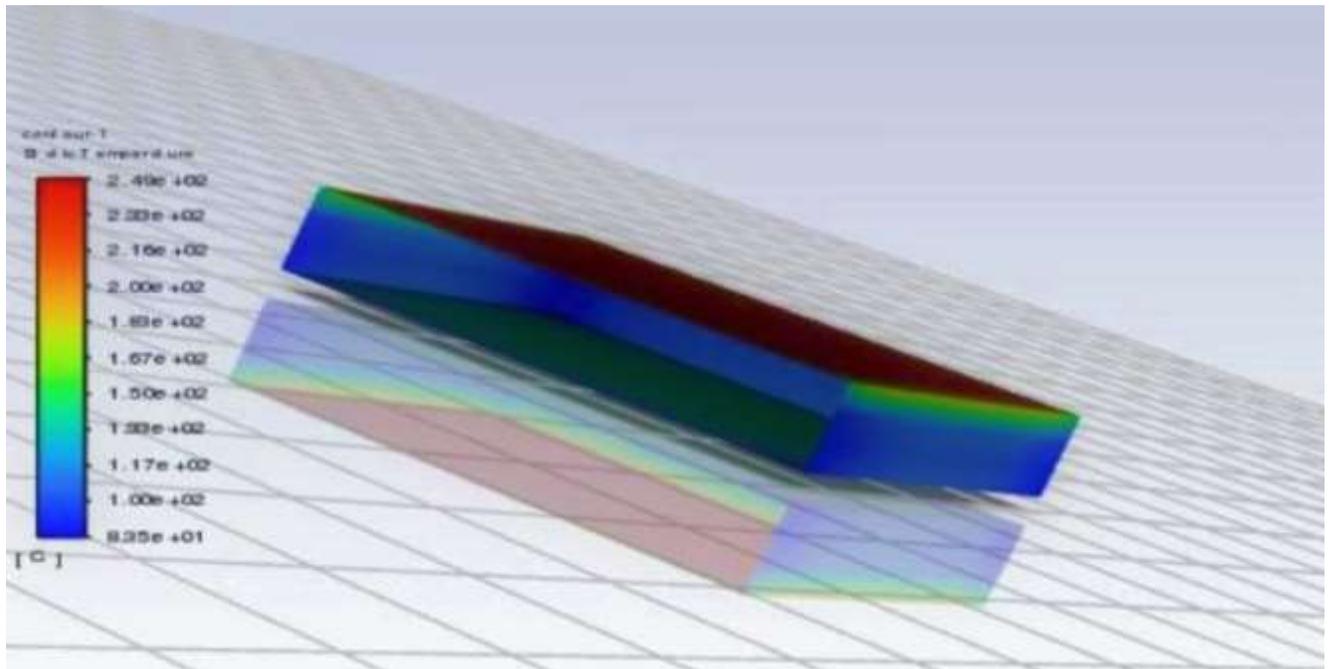


Figura 50. Análisis general del horno

En la figura 51 se observa la variación de temperatura entre el horno y la lámina **Figura 51** del termoformado

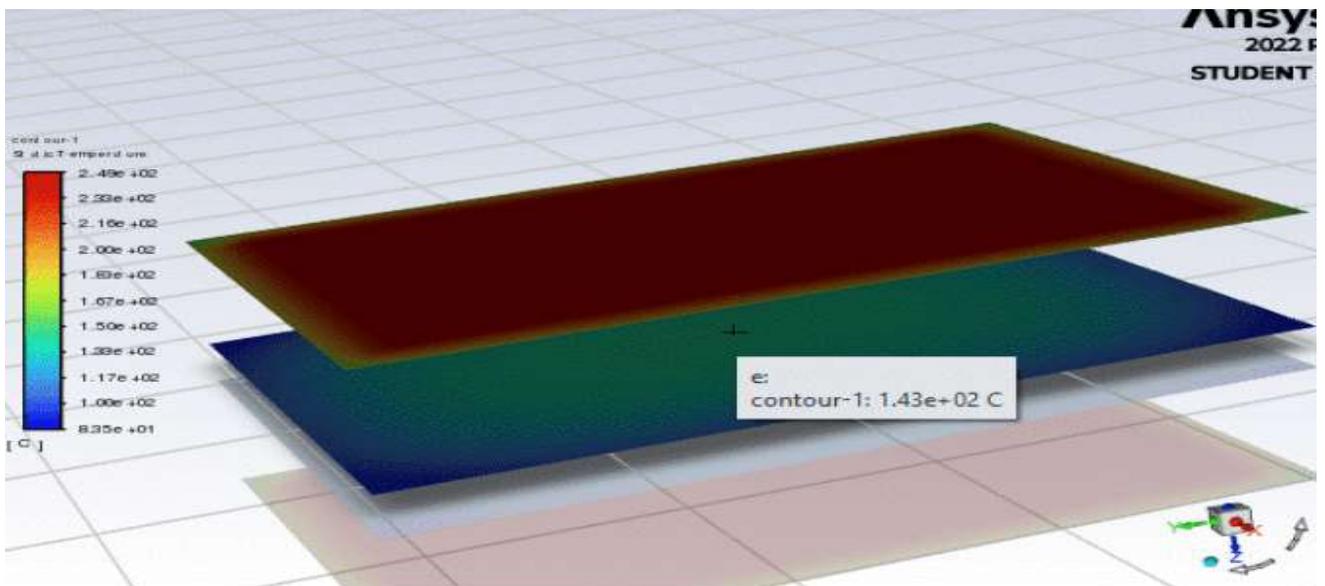


Figura 51. Análisis horno y lámina

1.16.3. Simulación Neumática:

En la figura 52 se describe el proceso de simulación neumática tenemos la conexión de un compresor a una unidad de mantenimiento que permite controlar de mejor manera el paso y filtración de aire, al accionar una válvula de 3 vías permitiendo el paso **Figura 52** y cierre de aire al generador de vacío conectado a la ventosa. [42]

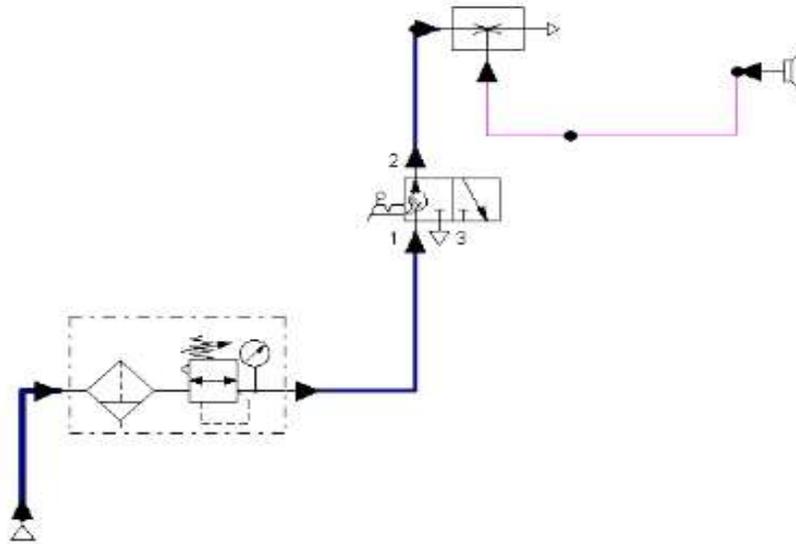


Figura 52. Simulación neumática

1.16.4. Simulación Eléctrica:

El circuito empieza con la conexión de un relé de estado sólido que está conectado a una lámpara L1 (representación de la bomba) para que funcione la misma debe tener una alimentación CA, el control para que el relé se active o se desactive estará dado por pulsos que mandara la tarjeta Arduino mega 2560, lo mismo se tiene para la conexión L2(resistencia eléctrica) y de igual forma la conexión y desconexión del relé se tiene mediante pulsos de la tarjeta

La tarjeta empezara su funcionamiento con una alimentación de corriente directa, el primer mensaje que dará será “bienvenidos”, a continuación, se mostrara la temperatura de la termocupla que está conectada cerca de la resistencia eléctrica, una vez llegada a temperatura de termoformado se iniciara con el proceso de vaciado en el cual la programación me indica los pulsos de salida que irán a los relés, para volver a reiniciar el proceso tendremos que pulsar el botón 1

En la figura 53 vemos la energización del circuito al darnos un mensaje de bienvenida con el cual comienza **Figura 53** el proceso de termoformado

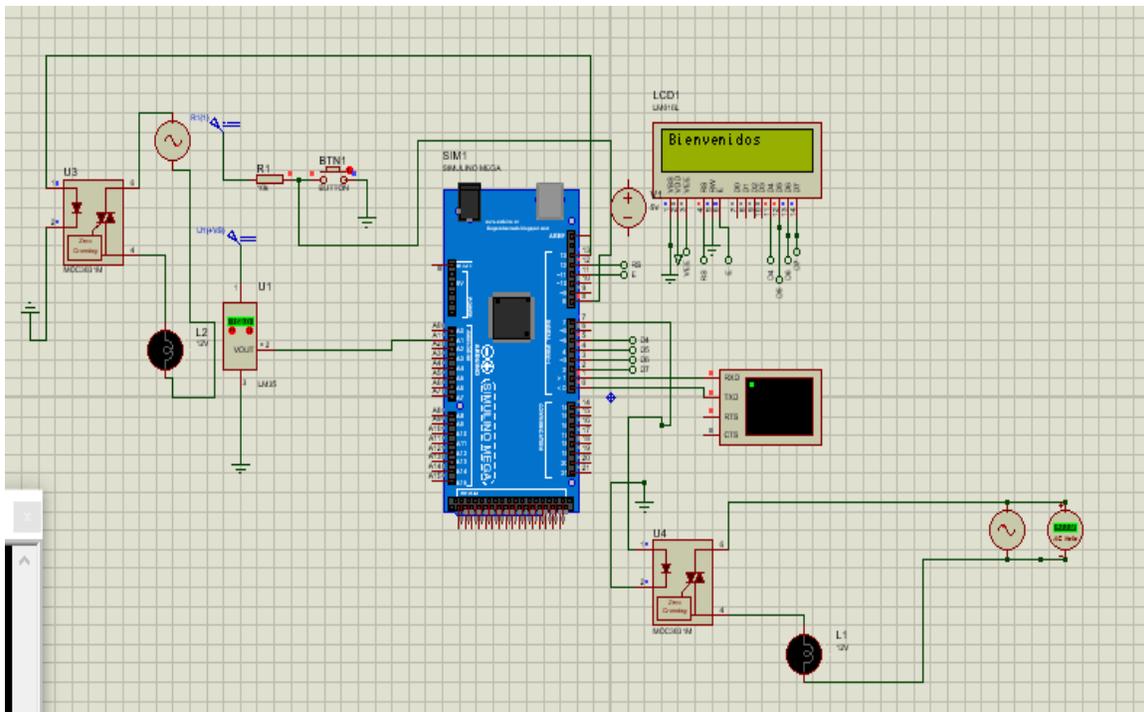


Figura 53. Energización del circuito

En la figura 54 se muestra de la temperatura de la lámina al encenderse la resistencia y estar en contacto **Figura 54** con el horno

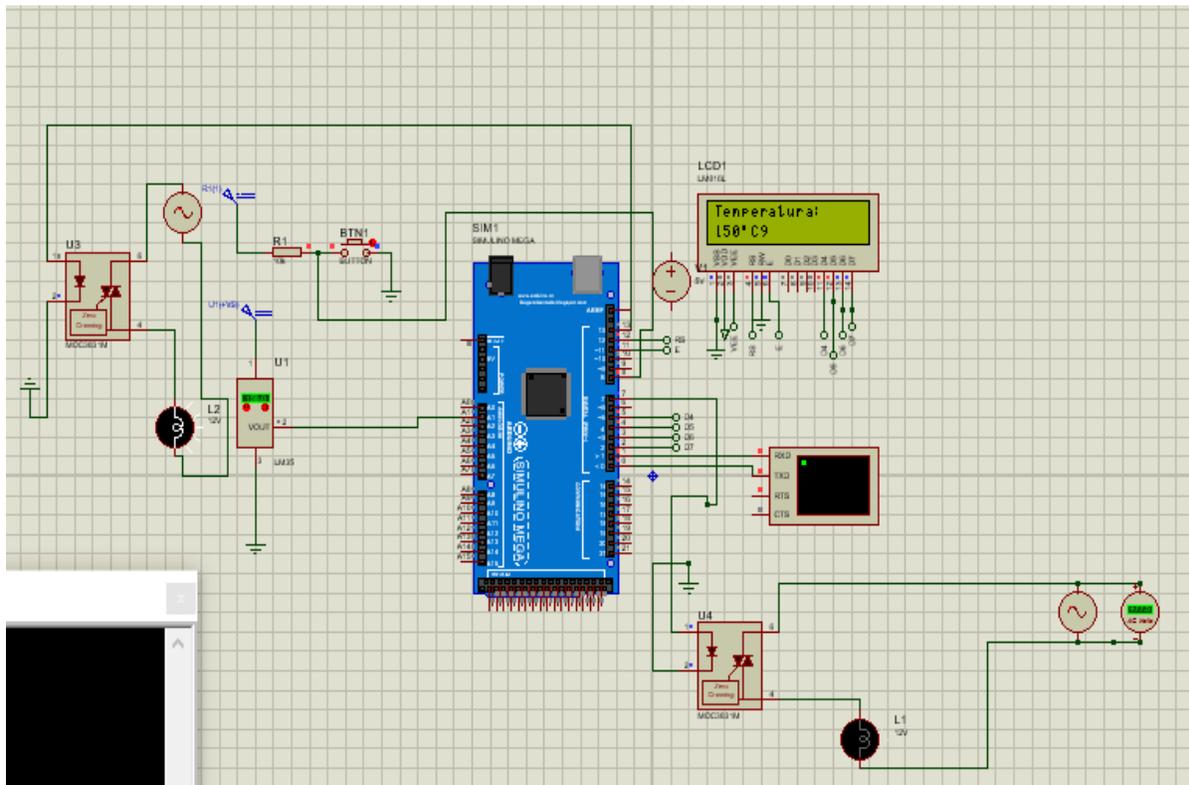


Figura 54. Temperatura de la lámina

En la figura 55 se observa el inicio del proceso de vaciado cuando comienza a actuar **Figura 55** la bomba de vacío.

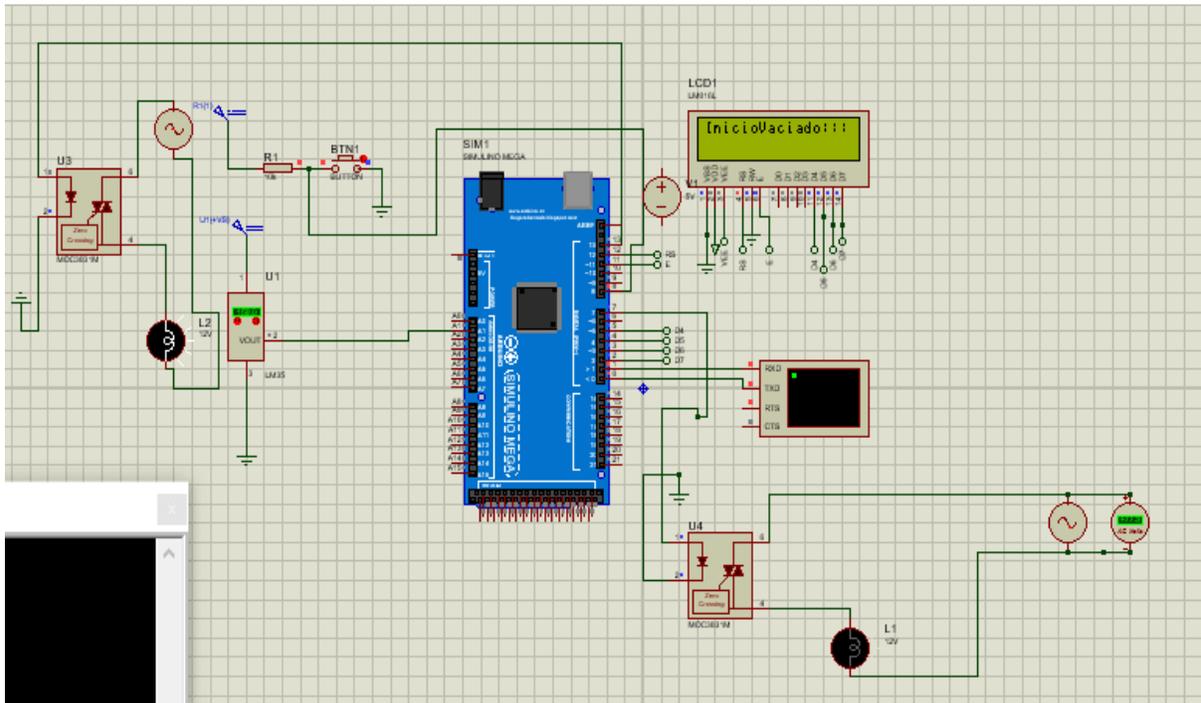


Figura 55. Inicio del vaciado

En la figura 56 se observa el tiempo de espera en realizar el proceso de vaciado antes de bajar al molde **Figura 56** y adquirir la forma requerida

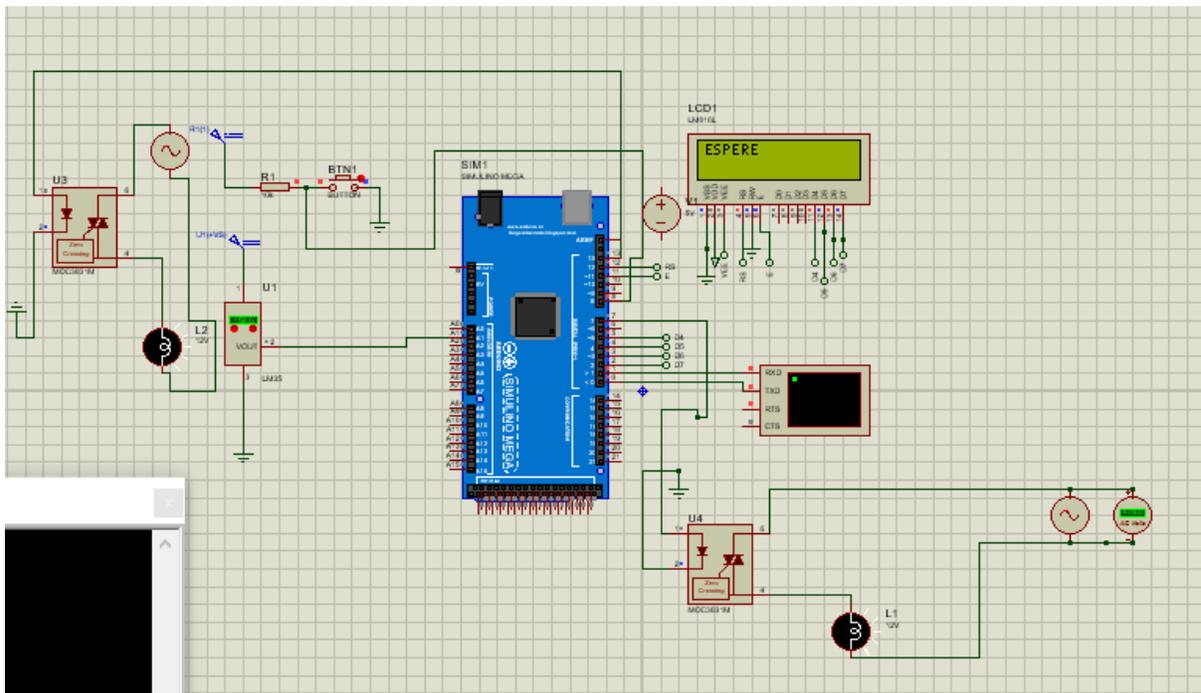


Figura 56. Tiempo de vaciado

En la figura 57 se observar el proceso de un nuevo reinicio del sistema de la máquina **Figura 57** de termoformado

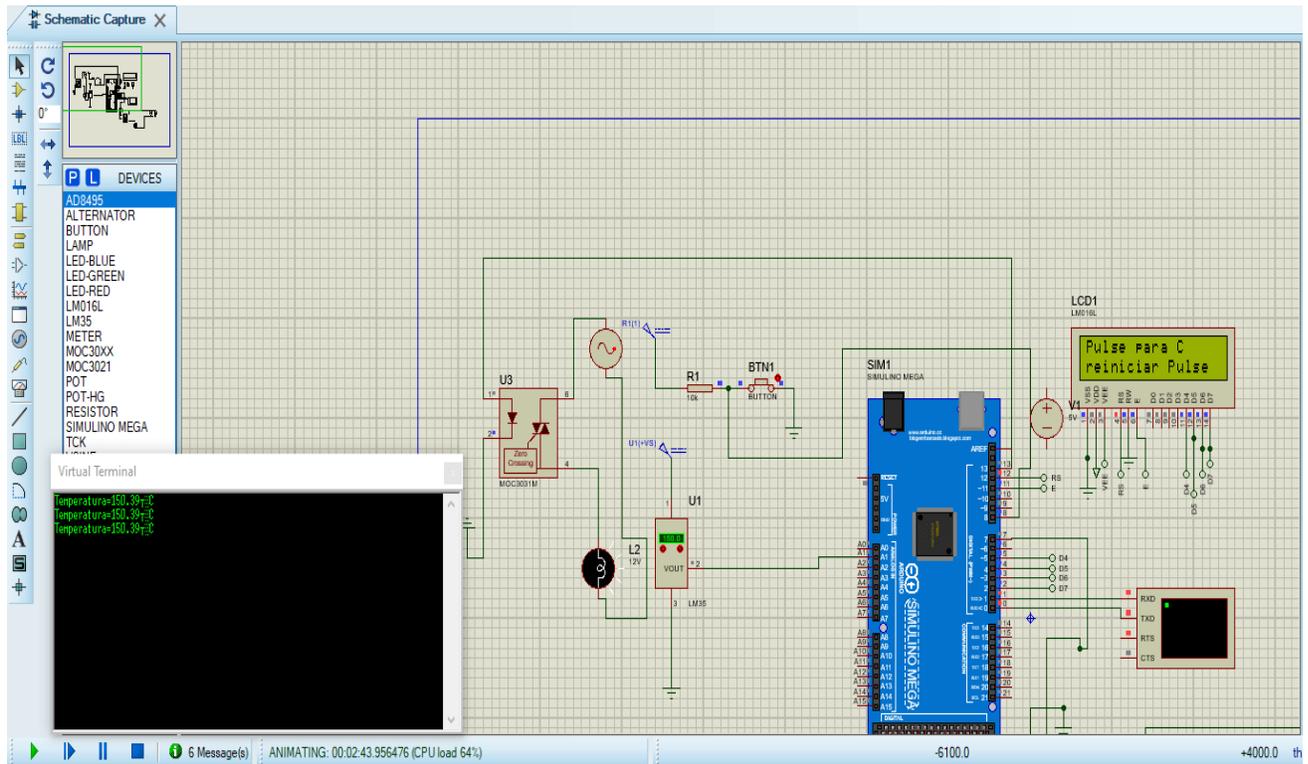


Figura 57. Reinicio del sistema

1.16.1. Comparativa y análisis margen de error:

En la tabla 23 se obtuvo el margen de error entre los diseño estructurales y térmicos dándonos un margen admisible **Tabla 23** de validación

Tabla 23. Comparativa diseño vs Simulación térmica

Margen de error				
Nombre	Numeración	Teórico	Simulación	% Error
Esfuerzo máximo (N/m ²)	1	13,93	13,89	0,2871
Factor de seguridad	2	15	15	0
Esfuerzo a compresión	3	1,094	1,0942	0,018
Presión crítica (kN)	4	102,89	101,75	1,10
Deflexión máxima permitida (m)	5	0,00138	0,001369	0,79
Esfuerzo Von mises (N/m ²)	6	1,33	1,2729	4,29
Factor de seguridad	7	15	15	0
Temperatura (°C)	8	140	143	2,14

En la figura 58 se realizo un gráfico de barras de los datos teóricos y simulados del margen de error obtenido **Figura 58** en los cálculos picipales de los diseño estructurales y térmicos.

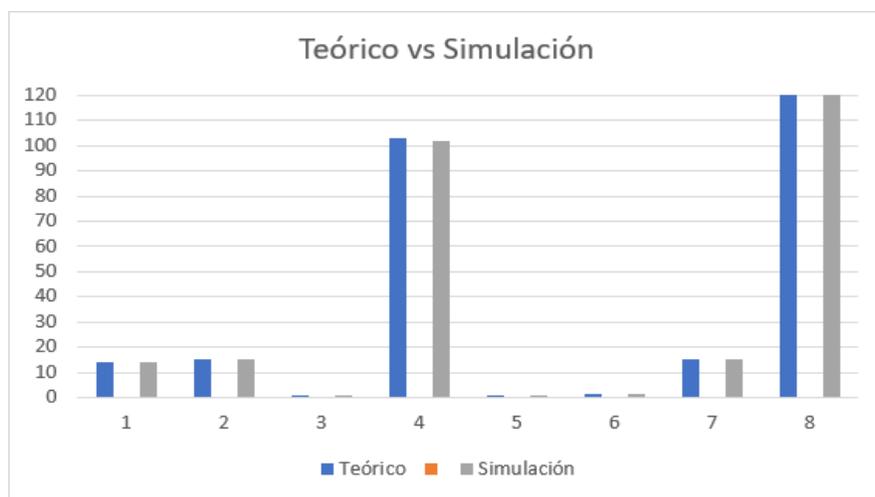


Figura 58. Gráfico de barras

Los resultados finales de la tesis del diseño y simulación de una máquina termoformadora demostraron un margen de error menor al 5%, por lo que se considera un análisis valido y factible para considerarlo en posteriores trabajos de investigación como de guía para otros proyectos.

El error máximo que se tiene en los resultados corresponde al esfuerzo de Von mises que es de 4,29 %, siendo este un error aceptable.

1.17. Análisis de Costos

En la tabla 24 se realizó el análisis de costos para determinar qué tan rentable es un maquina termoformadora para los laboratorios **Tabla 24** de la Universidad Politécnica Salesiana

Tabla 24. Comparativa diseño vs Simulación térmica

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Tol 1,5mm	1	30	30
Tubo rectangular 20x40x2mm	1	30	30
Tubo cuadrado de 25x25x1,5mm	1	15	15
Guías Lineales	1	70	70
Fibra de vidrio	1	20	20
Tol 0,7 mm	1	20	20
Resistencia eléctricas	1	50	50
Tolva	1	30	30
Cámara de termoformado	1	30	30
Pistón simple efecto con resorte	1	75	75
Unidad de mantenimiento	1	100	100
Válvula de apertura	1	140	140
Filtro	1	20	20
Bomba de aire	1	15	15
Generador de vacío	1	10	10
Mangueras	1	15	15
Paro de emergencia	1	4	4
Botonera	1	8	8
Timer	1	10	10
Termocuplas	1	10	10
Arduino Mega	1	15	15
Cables	1	6	6
Enchufe	1	2	2
Display	1	10	10
Total		735	

CONCLUSIONES

1. Se diseñó y validó mediante simulación de elementos finitos una máquina termoformadora, el error que se tuvo en los distintos resultados es menor al 5%, factible de construirse prototipo.
2. En la actualidad los polímeros están en auge debido a que la mayoría de empresas utilizan en sus labores el termoformado siendo uno de los mercados que tiene mayor crecimiento a nivel nacional, llegando a reemplazar en algunos casos los procesos de inyección de plástico.
3. Se realizó un dimensionamiento en base a un área a dos metros cuadrados, espacio provisto para la máquina de termoformado en el laboratorio de conformado mecánico.
4. En el diseño térmico se obtuvo la potencia de la resistencia calefactora que es de 85,13[Watt], valor necesario para que la lámina PET y PVC lleguen a la temperatura de 140°C, alcanzado estabilidad dependerá directamente de su espesor. Estos datos nos ayudarán a que el proceso de termoformado se realice de forma correcta y no exista sobredimensionamiento de la potencia, disminuyendo el consumo y el riesgo de accidentes.
5. En el diseño estructural las vigas y columnas que soportan el peso de la cabina con un factor de seguridad de 15 siendo este un valor alto con respecto al recomendado por distintos autores que este valor siempre debe ser mayor a 2, el valor de deflexión máximo calculado que tienen las vigas es de 0,0025 m mucho mayor al simulado de 0.0000628 m ; por otro lado las columnas poseen una relación de esbeltez de 54,63 y una relación de esbeltez crítica de 125,66 cumpliendo con la siguiente premisa $\lambda < \lambda_{cr}$ que es el recomendado por los autores validando el análisis de pandeo para columnas. En el diseño eléctrico y electrónico se toma en cuenta un Arduino Mega el cual se acopla un LCD, que nos permite tener una interfaz amigable con el usuario dando los valores de temperatura en tiempo real y reportando cada proceso que se hace. En el diseño neumático se toma en cuenta una bomba de 10 Watt que será suficiente para el proceso de vaciado ya que es un área de termoformado pequeña, se toma en cuenta que es un valor cercado a la realidad y no en términos ideales.

6. La comparación de diferentes parámetros nos da los porcentajes de error que se muestran en la tabla 20 los cuales son menores al 5% con respecto a la simulación. El error más grande es el esfuerzo de Von Mises que es de 4,29% pero siendo este aceptable.
7. Se realizó un análisis financiero dándonos un costo total de la máquina de 735 dólares, siendo un factor viable para la construcción debido a que son necesarias realizar diferentes pruebas y ensayos para su construcción

RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas en el laboratorio y corroborar con los resultados analíticos y simulados
2. Realizar la programación con PID para las pruebas de laboratorio de tal manera que se logre estabilizar la temperatura del horno.
3. Considerar para construcción un aislamiento en donde se va a asentar la lámina con la viga
4. Realizar varias pruebas para los cálculos de las láminas PET/PVC ya que las variables termofísicas pueden variar de acuerdo al fabricante.
5. Realizar la soldadura filete especificada en el capítulo de diseño con un soldador certificado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Sebastian, A. Jose, M. Palacio y N. Vergara, «Academia.edu,» 18 Mayo 2016. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/29481464/TERMOFROMADO_DE_PLASTICOS. [Último acceso: 24 Octubre 2022].
- [2] V. Vilca y C. Caceres, Estudio del proceso de termoformado, Lima, 2017.
- [3] L. Castro y J. Cortés, Modelo matemático de un horno resistivo para termofromado de láminas de polipropileno, Cuenca: Revista Ingenius, 2022.
- [4] T. Vanegas, Rediseño y fabricación de maquina termofromadora al vacío, Bogota: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2009.
- [5] L. S, «Estudio de la fluencia termica de Pet reciclado,» Investigación y Ciencia, vol. 22, nº 61, 2014.
- [6] F. López, Fundamentos de los polímeros, Mérida: Universidad de los Andes, 2004.
- [7] É. Hermida, Polímeros, Buenos aires: Ministerio de educación, 2011.
- [8] Leonardo, «gr,» 1 Marzo 2012. [En línea]. Available: <https://www.leonardogr.com/es/blog/caracter-sticas-del-pet-poli-etil-no-tereftalato>. [Último acceso: 2 Febrero 2023].
- [9] L. Gastón, «Construcciones en seco,» 7 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://construccionenseco.net/materiales/que-es-pvc-usos-caracteristicas-y-ventajas/>. [Último acceso: 2 Febrero 2023].

- [10] J. Carlos y V. Landa, «Química General,» 13 Mayo 2011. [En línea]. Available: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/tema>. [Último acceso: 3 Febrero 2023].
- [11] Mariano, «Tecnología de los Plásticos,» 30 05 2011. [En línea]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>. [Último acceso: 3 Noviembre 2022].
- [12] Y. Vergara y M. García, Automatización del proceso de selección de plásticos reciclados en Colombia, Nueva Granada: Universidad Militar Nueva Granada, 2018.
- [13] Plastigas, 2012. [En línea]. Available: https://www.plastigas.com.mx/pdfs/literatura/Manual_termoformado.pdf. [Último acceso: 23 Diciembre 2022].
- [14] PassatInnovations LLC, «directindustry,» [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/passatinnovations-llc/product-222709-2319844.html>. [Último acceso: 13 Febrero 2023].
- [15] J. Toro, C. Augusto, A. Hincapié, P. Simanca, E. Torres y L. Loaiza, «Intervención tecnológica para la reconversión y automatización de una máquina termoformadora por vacío de una sola estación,» Scielo, vol. 16, n° 32, p. 8, 2019.
- [16] P. Baños, «Maquina de Termoformado,» 19 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.pinterest.es/pin/253890497732737183/>. [Último acceso: 13 Febrero 2023].
- [17] ToolCraft, «Toolcraftplastics,» 3 Noviembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.toolcraft.co.uk/vacuum-forming/advice/advice-vacuum-forming-design-guide.htm#>. [Último acceso: 13 Febrero 2023].
- [18] NA, «Aliexpress,» 13 Diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/i/4000225217439.html>. [Último acceso: 13 Febrero 2023].

- [19] SolidWorks, Diseño de Viga, Quito, 2023.
- [20] Philpot y T, Diagrama de cortante, Quito: Copyrigt, 1997-2014.
- [21] D. Porras, A. Goñe y M. Sayabe, «Esfuerzo en vigas,» 20 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/alianza123/esfuerzo-en-vigas>. [Último acceso: 14 Febrero 2023].
- [22] M. Mora, «Mecapedia,» 29 Septiembre 2022. [En línea]. Available: http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio_de_von_Mises.html. [Último acceso: 14 Febrero 2023].
- [23] A. Javier, «Mecapedia,» 28 Julio 2022. [En línea]. Available: http://www.mecapedia.uji.es/pages/coeficiente_de_seguridad.html. [Último acceso: 14 Febreo 2023].
- [24] R. Granados, «mejorconacero,» 19 Mayo 2011. [En línea]. Available: <http://www.mejorconacero.com/wp-content/uploads/FLEXION-1.pdf>. [Último acceso: 14 Febrero 2023].
- [25] M. West y G. Lawrance, Seviceability design, Estados Unidos, 2004.
- [26] J. Carlos, «Blogger,» 16 Junio 2011. [En línea]. Available: <https://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2021/06/propiedades-geometricas-ii.html>. [Último acceso: 14 Febrero 2023].
- [27] Jhonston,Beer, «Birthlh,» 2003. [En línea]. Available: https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/DPM/DPM04/es_DFM_DPM04_Contenidos/website_anexo_licencias_de_recursos.html. [Último acceso: 14 Febrero 2023].

- [28] Universidad Católica de Perú, Wordpress, Perú, 2016.
- [29] django-wiki, «LabsterTheory,» 16 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://theory.labster.com/compressive-strength-es/>. [Último acceso: 14 Febrero 2023].
- [30] L. Rocha, «Scribd,» 4 Diciembre 2011. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/74698420/Esfuerzo-critico>. [Último acceso: 14 Febrero 2023].
- [31] R. G. Budynas y K. N. J., Diseño en Ingeniería mecánica, México: McGrawHill, 2012.
- [32] F. Kreith, R. Manglik y M. Bohn, Principios de transferencia de calor, México: Cengage Learning, 2015.
- [33] F. Incropera y D. Dewitt, Fundamentos de transferencia de calor, Mexico: Prentice Hall, 1999.
- [34] Y. Cengel y A. Ghajar, Transferencia de calor y masa, México: Marcela I. Rocha Martínez, 2011.
- [35] J. Conesa, «dspace,» 2013. [En línea]. Available: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20%28CONDUCCION%2C%20CONVECCION%2C%20RADIACION%29.pdf>. [Último acceso: 2023 Febrero 2023].
- [36] Haverland 2020, «Haverland,» 29 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://haverland.com/2019/11/29/que-es-calor-especifico-concepto-formulas-y-ejemplos/>. [Último acceso: 16 Febrero 2023].

- [37] SolidWorks, Mesa de vacío, Quito, 2023.
- [38] Solidworks, Volumen de la tolva, Quito, 2023.
- [39] Solidworks, Volumen camara de termofromado, Quito, 2023.
- [40] E. González, Hidráulica básica, México: Gema Alín Martínez Ocampo, 2018.
- [41] Y. Cengel y J. Cimbala, Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones, México: McGrawhill, 2018.
- [42] Fluidsim, Simulación Neumática, Quito, 2023.
- [43] «mas ferreteria,» 13 Enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.xn--masferreteria-2fb.com/blog/un-interruptor-electrico-que-es-como-funciona-y-tipos-de-interruptores/>. [Último acceso: 23 Diciembre 2022].
- [44] E. U. d. Monterrey, 19 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.electronicauniversal.com.mx/2021/10/19/que-es-un-rele-de-estado-solido/>. [Último acceso: 23 Diciembre 2022].
- [45] CAMEI. [En línea]. Available: <https://www.camei.com.ec/shop/product/se-xb5as8442-pulsador-parada-de-emergencia-con-enclavamiento-liberacion-de-giro-22mm-1nc-2594?page=2&category=256>. [Último acceso: 23 Diciembre 2022].

- [46] Y. Fernandez, «Xataka,» 23 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>. [Último acceso: 23 Diciembre 2022].
- [47] B. Victoria, «Definicion ABC,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.definicionabc.com/tecnologia/display.php>. [Último acceso: 23 Diciembre 2022].