

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE TERMOFORMADO MULTIFUNCIONAL DIDÁCTICA
PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS EN LA FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE
AMÉRICA**

**JUAN SEBASTIAN LÓPEZ RODRÍGUEZ
EDWIN ALEXANDER LOZANO BUITRAGO**

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

**Orientador
OSCAR CHAMARRAVI GUERRA
Ingeniero Metalúrgico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTA D.C**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá D.C Agosto de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. MARIO POSADA GARCÍA PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJÌA GUZMÀN

Vicerrector Administrativa y Financiera

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General

Dr. JOSE LUIS MACIAS RODRIGUEZ

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Directora Programa Ingeniería Mecánica

Ing. MARÌA ANGELICA ACOSTA PÈREZ

DEDICATORIA

A Dios, a nuestros padres, familiares, compañeras sentimentales y amigos que nos
brindaron su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Aprovechamos este espacio para agradecer primero a Dios por guiarnos y brindarnos fortaleza en el camino hacia este título universitario, a nuestros padres por confiar, creer en nuestros sueños y darnos las herramientas para alcanzarlos, a nuestras compañeras sentimentales por ser ese apoyo emocional ante los obstáculos y adversidades que se presentaron durante este camino, a nuestros amigos y compañeros que hicieron parte de experiencias gratas y enriquecedoras y por ultimo pero no menos importante al Ingeniero Oscar Chamarravi, demás docentes y directivos que siempre estuvieron dispuestos a transmitirnos sus conocimientos con total disposición y formarnos como profesionales.

Las directivas de la universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas, expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1 Antecedentes	18
1.2 Pregunta de investigación	20
1.3 Justificación	20
1.4 Delimitación	21
1.5 Hipótesis	22
1.6 Diseño metodológico	23
1.7 Objetivos	24
1.7.1 <i>Objetivo general</i>	24
1.7.2 <i>Objetivos específicos</i>	24
2. PARÁMETROS BÁSICOS Y REQUERIMIENTOS FUNCIONALES PARA LA MÁQUINA DE TERMOFORMADO	25
2.1 Formado al vacío	25
2.2 Formado por soplado	26
2.3 Proceso de formado mecánico	26
2.4 Materia prima	29
2.5 Parámetros del proceso	32
2.5.1 <i>Tiempo de calefacción</i>	32
2.5.2 <i>Temperatura máxima de calentamiento</i>	32
2.5.3 <i>Tiempo de vacío</i>	32
2.5.4 <i>Tiempo de compresión</i>	32
2.5.5 <i>Tiempo de refrigeración</i>	32
2.5.6 <i>Recorrido del molde</i>	32
3. ALTERNATIVAS DE DISEÑO	33
3.1 Requerimientos de la máquina	33
3.2 Matriz de priorización	34
3.2.1 <i>Criterios de diseño</i>	34

3.2.2	<i>Selección de alternativas</i>	35
3.2.3	<i>Identificación de aspectos e impactos ambientales</i>	46
4.	DESARROLLAR EL DISEÑO EN DETALLE DEL PROTOTIPO QUE COMPONE LA ALTERNATIVA YA SELECCIONADA	52
4.1	Sistema de calentamiento	52
4.1.1	<i>Análisis de transferencia de calor</i>	52
4.2	Sistema de vacío	55
4.2.1	<i>Selección del tanque acumulador de vacío</i>	61
4.3	Sistema de soplado	62
4.4	Sistema de desplazamiento	64
4.5	Estructura	67
4.5.1	<i>Cálculo de cargas sobre las vigas</i>	69
4.5.2	<i>Selección del perfil</i>	107
4.5.3	<i>Cálculo de cargas en las columnas</i>	111
4.5.4	<i>Elementos finitos</i>	116
5.	MANUAL INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN CON SUS RESPECTIVAS GUÍAS DE LABORATORIO Y MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA	119
5.1	Manual instructivo de operación	119
5.1.1	<i>Seguridad</i>	119
5.1.2	<i>Simbología</i>	120
5.1.3	<i>Instrucciones de uso</i>	126
5.1.4	<i>Características técnicas</i>	130
5.2	Mantenimiento de la termoformadora multifuncional	131
5.2.1	<i>Bomba de vacío Robinair Ref 15800</i>	132
5.2.2	<i>Tanque de almacenamiento Big Red T88007 Torin</i>	133
5.2.3	<i>Sistema de calentamiento</i>	134
5.2.4	<i>Cilindros neumáticos</i>	135
5.3	Guías de laboratorio	136
6.	ANALIZAR FINANCIERAMENTE LA VIABILIDAD DEL PROYECTO	137
6.1	Costo de materia prima estructural, máquinas y elementos obtenidos por catálogo	137
6.2	Costos de talento humano y mano de obra	140

6.3 Costo final del diseño de la termoformadora multifuncional	141
6.4 Costo de venta	142
6.5 Comparativa comercial	143
7. CONCLUSIONES	144
BIBLIOGRAFÍA	146
ANEXOS	147

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diseño metodológico de la termoformadora multifuncional	23
Figura 2. Formado por vacío	25
Figura 3. Formado por presión positiva	26
Figura 4. Formado mecánico	27
Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de formado multifuncional	28
Figura 6. Matriz de aspectos e impactos ambientales del proceso de termoformado	50
Figura 7. Molde para termoformado	56
Figura 8. Mesa de vacío	58
Figura 9. Catálogo de manguera neumáticas	59
Figura 10. Catálogo de bombas de vacío	61
Figura 11. Boquillas exair	63
Figura 12. Boquilla de soplado UEA D020	64
Figura 13. Ilustración de la termoformadora multifuncional con nomenclatura de cada elemento que conforman los sistemas.	69
Figura 14. Nomenclatura en cada apoyo de la estructura	70
Figura 15. Nivel superior con nomenclatura en los puntos de apoyo	71
Figura 16. Diagrama de cuerpo libre con cargas aplicadas y reacciones en la viga 2-7	72
Figura 17. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector para la viga 2-7	74
Figura 18. Diagrama de cuerpo libre con cargas aplicadas y reacciones en la viga 1-4	75
Figura 19. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector para la viga 1-4	77
Figura 20. Nivel intermedio con nomenclatura en los apoyos y secciones	78
Figura 21. Ilustración del nivel intermedio con áreas tributarias definidas	80
Figura 22. Diagrama de cuerpo libre sobre la viga 9-10	82
Figura 23. Diagrama de cuerpo libre con carga localizada en 9-10	83
Figura 24. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector para la viga 9-10	85
Figura 25. Ilustración del nivel intermedio con áreas tributarias definidas	87
Figura 26. Diagrama de cuerpo libre sobre la viga 9-10	89

Figura 27. Diagrama de cuerpo libre con carga localizada en 9-10	90
Figura 28. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector para la viga 9-12	92
Figura 29. Ilustración nivel inferior con nomenclatura en los apoyos y cargas distribuidas en las vigas	94
Figura 30. Diagrama de cuerpo libre con cargas y reacciones en la viga 16-30	95
Figura 31. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector para la viga 16-30	97
Figura 32. Diagrama de cuerpo libre con cargas aplicadas y reacciones en la viga 29-34	98
Figura 33. Diagrama de fuerza cortante y momento flector para la viga 29-34	100
Figura 34. Diagrama de cuerpo libre con cagas y reacciones en la viga 18-25	101
Figura 35. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector en la viga 18-25	103
Figura 36. Diagrama de cuerpo libre con cargas y reacciones en la viga 19-24	104
Figura 37. Diagrama de fuerza cortante y momento flector para la viga 19-24	106
Figura 38. Catalogó de perfilería cuadrada	109
Figura 39. Catalogó de perfiles en L con lados iguales	110
Figura 40. Simulación con esfuerzo de Von Mises	117
Figura 41. Simulación con desplazamientos nodales	117
Figura 42. Panel de control de termoformadora	123
Figura 43. Diagrama de instrumentación circuito termoformado	124
Figura 44. Plano P&ID de control de la máquina de termoformado multifuncional	125
Figura 45 Diagrama de flujo del proceso de termoformado multifuncional	126
Figura 46. Bomba de vacío Robinair	132
Figura 47. Tanque de almacenamiento Big Red	133
Figura 48. Resistencia eléctrica en cuarzo	134
Figura 49. Cilindro neumático de doble efecto	135

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Variables del proceso de termoformado	30
Tabla 2. Variables de la máquina de termoformado	31
Tabla 3. Propiedades de los polímeros a utilizar en el proceso de termoformado	34
Tabla 4. Criterios de termoformado	35
Tabla 5. Características de alternativas en el sistema de calentamiento	37
Tabla 6. Matriz de decisión del sistema de calentamiento	38
Tabla 7. Características de alternativas en el sistema de enfriado	39
Tabla 8. Matriz de decisión del sistema de enfriamiento	39
Tabla 9. Características de alternativas en el sistema de presión	40
Tabla 10. Matriz de decisión del sistema de presión	41
Tabla 11. Características de alternativas en el sistema de desplazamiento	42
Tabla 12. Matriz de decisión del sistema de desplazamiento	43
Tabla 13. Características de alternativas en el sistema estructural	44
Tabla 14. Matriz de decisión del sistema estructural	44
Tabla 15. Caracterización y forma del desarrollo de la valoración de cada parámetro ambiental	48
Tabla 16. Jerarquización de impactos ambientales	49
Tabla 17. Propiedades del polímero y proceso de calentamiento de la termoformadora	54
Tabla 18. Calor requerido	54
Tabla 19. Ficha técnica del tanque de almacenamiento	62
Tabla 20. Elementos a desplazar	65
Tabla 21. Elementos que conforman la máquina de termoformado	68
Tabla 22. Cargas y momentos aplicados en el primer nivel	78
Tabla 23. Tabla de resultado nivel intermedio	93
Tabla 24. Cargas aplicadas sobre las vigas del nivel 3	107
Tabla 25. Cargas que actúan sobre las columnas	111
Tabla 26. Cargas que actúan sobre la sección de columna	112
Tabla 27. Características del acero estructural	116

Tabla 28. Descripción de señales	120
Tabla 29. Descripción de panel de control	122
Tabla 30. Nomenclatura de instrumentación	125
Tabla 31. Instrucciones de uso de la máquina de termoformado multifuncional	127
Tabla 32. Características técnicas de la máquina de termoformado multifuncional	130
Tabla 33. Check list termoformadora	131
Tabla 34. Costos de materia prima estructural	138
Tabla 35. Costos de sistema de calentamiento	138
Tabla 36. Costos de sistema de vacío	139
Tabla 37. Costos de sistema de soplado	139
Tabla 38. Costos de sistema de desplazamiento	140
Tabla 39. Costos de instrumentación	140
Tabla 40. Costos de talento humano	141
Tabla 41. Costos de mano de obra	141
Tabla 42. Costo final del proyecto de la termoformadora multifuncional	142
Tabla 43. Costo final de venta comercial	142
Tabla 44. Costos comerciales de termoformadora	143

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. Guía de laboratorio para el proceso de formado por vacío	148
Anexo 2. Guía de laboratorio para el proceso de formado por soplado	157
Anexo 3. Guía de laboratorio para el proceso de formado mecánico	167
Anexo 4. Cotización Termoformados Osorno	178
Anexo 5. Cotización Universal Maquinaria y Guillotinas S.A.S	179
Anexo 6. Cotización Verpacken	180
Anexo 7. Catálogo tornillos hexagonales rosca completa	183
Anexo 8. Catálogo tuercas hexagonales	183
Anexo 9. catálogo tornillos cabeza avellanada plana	184
Anexo 10. Acople rápido para aire macho	184
Anexo 11. Acople rápido para aire hembra	185
Anexo 12. Temporizador digital multifunción	185

RESUMEN

Este documento presenta el desarrollo del diseño de una máquina de termoformado multifuncional, la cual se planteó como alternativa a implementar en los laboratorios de la Fundación Universidad de América, con la finalidad de brindar apoyo en la enseñanza y aprendizaje de los procesos de manufactura con los polímeros.

Para esto se plantea una propuesta de máquina que llevara consigo los tres métodos de termoformado, proponiendo así diferentes tipos de alternativas a los sistemas y subsistemas que conforman la máquina, seleccionando la mejor alternativa basándonos en criterios y requerimientos a través de una matriz de decisión y priorización la cual facilita y brinda una mejor selección de alternativas; realizando los cálculos correspondientes de los mismos.

De igual modo para permitir la ejemplificación de los procesos de termoformado se plantea, manual instructivo y de mantenimiento junto a sus respectivas guías de laboratorio y casi de manera simultánea el correspondiente análisis de costos que permite contar con una referencia de requerir su fabricación.

PALABRAS CLAVE: Termoformado, Diseño, Polímeros, Multifuncional, Didáctico, Procesos.

INTRODUCCIÓN

La transformación de fibras naturales a través de reblandecimiento por calor, es una técnica que dio principio gracias al desarrollo de los materiales termoplásticos durante la segunda guerra mundial, que trajo consigo grandes desarrollos tecnológicos, así como altos volúmenes de comercialización de piezas termoformadas.

Con el transcurrir del tiempo esta técnica de formado fue evolucionando implementando métodos cuyo principal objetivo fue satisfacer las altas demandas de piezas que se podían obtener por este proceso, dando un paso importante en la implementación del vacío junto a controladores digitales.

No contentos con el formado que les generaba el vacío, se opta por formar mediante la presión positiva, capaz de alcanzar niveles más altos de presión sobre las láminas a formar dando mejores acabados en piezas con grandes profundidades.

Continuaron los avances de investigación en la transformación de láminas semi elaboradas de polímeros por medio del termoformado; es acá donde surge el proceso más completo que es el formado mecánico, el cual permite realizar geometrías con mayor grado de dificultad.

Del mismo modo el desarrollo de este proyecto pretende impactar en los procesos de termoformado, brindando como nueva alternativa la combinación de estas tres técnicas en una sola máquina, brindando la capacidad de formar mayor número de geometrías, ahorrar espacio, disminuir costos de fabricación y ofrecer herramientas de aprendizaje que mejoren y fortalezcan el aprendizaje en procesos de manufactura con polímeros.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria de transformación de polímeros existen diversos procesos que requieren equipos de elevados costos, que permiten la realización de diferentes tipos de geometrías; actualmente para la elaboración de estas, se utilizan tres procesos principales los cuales son: Termoformado por vacío, termoformado mecánico (molde y contra moldé) y termoformado por libre soplado, que permiten efectuar la gran mayoría de formas que requiere tomar el polímero.

Durante este proceso las diversas empresas que lo emplean cuentan con un equipo diferente para abarcar la totalidad del mercado, y algunas de ellas únicamente prestan el servicio para geometrías específicas que el proceso más común se lo permite y es el de termoformado por vacío. Es por eso que surge la necesidad de realizar el diseño de un prototipo de equipo multifuncional que permita cubrir la mayor parte de geometrías que los procesos de termoformado soliciten.

Lo que se pretende al realizar este diseño es impactar notablemente en la reducción de costos y espacio que involucran los tres principios de termoformado en un solo equipo, sin afectar la calidad del producto final; que a su vez adopte una postura didáctica frente al proceso de formación académica que se emplea por parte de la Fundación Universidad de América y de los docente que la conforman, los cuales cuenta con una estrategia pedagógica basada en la teoría y la práctica, siendo esta última parte fundamental para el aprendizaje de los estudiantes en el cual son utilizados los laboratorios como forma didáctica para ampliar, consolidar y dar una mejor perspectiva de los conocimientos; para la ejecución de estas prácticas se hace indispensable en la gran mayoría de los casos el uso de elementos propios de la práctica, máquinas, equipos y bancos de prueba, los cuales resulta difícil adquirir por el elevado costo de sus fabricantes debido a su baja comercialización en la industria.

Todo lo anterior con el propósito de brindarle al estudiante competencias a través del cálculo de la temperatura adecuada que debe alcanzar el polímero, tiempos de calentamiento y enfriamiento que requieren, velocidad de presión positiva y negativa que

se le aplica en cada principio de termoformado y cantidad de material que se debe emplear para cada geometría entre otros; esto a través de tablas estandarizadas de rangos de temperatura, propiedades térmicas de cada material, conocimiento de espesor y geometría de cada molde en conjunto con conocimientos adquiridos con anterioridad en áreas de transferencia de calor, ingeniería de materiales y procesos.

1.1 Antecedentes

«A partir del siglo XX se comenzaron a conocer algunas técnicas del formado de láminas, con materiales como el metal, vidrio y fibras naturales; pero los verdaderos principios del termoformado se dieron con el desarrollo de los materiales termoplásticos, lo cuales surgieron durante la segunda Guerra Mundial y como consecuencia de ella en los años de postguerra se dieron grandes volúmenes de comercialización y el rápido desarrollo de equipos y maquinaria capaces de adaptarse a los métodos modernos de manufactura » [1].

En función de la implementación de este método de manufactura se realizaron múltiples estudios con el fin de determinar cuál era la materia prima más indicada para efectuar este proceso dando como resultado que todos los polímeros termoplásticos son adecuados para el proceso, pero aquellos que presentan propiedades más adecuadas son las láminas semi elaboradas de polímeros como: Acrílico extruido, Acrílico cell-cast, Acetobutirato de celulosa, Polietileno de alta densidad, Polipropileno, Poliestireno, Poliestireno alto impacto, Estireno acrilonitrilo (SAN), Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), Polivinilo de cloruro (PVC), Policarbonato; que en la actualidad son de mayor comercialización [1].

Frente al desarrollo de este proyecto se ha encontrado hasta el momento a nivel nacional una patente de investigación otorgada por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) a la Universidad Autónoma de Manizales que consiste en el diseño de una Termoformadora a partir de un dispositivo modular que permite calentar un material polimérico (termoplástico) hasta alcanzar una temperatura que facilite deformarse permanentemente, ya sea mediante presión mecánica (adquirir la forma del molde) o por

presión de vacío (recubre el modelo) lo que implica que es posible combinar varios principios de termoformado a partir de diferentes técnicas [2].

El Departamento de Mecánica y Producción de la misma Universidad, explica que uno de los factores diferenciadores más importantes radica en la posibilidad de realizar procesos simultáneos(dual) de termoformado mecánico y al vacío, asegurando que esta característica hasta la fecha de su publicación 17 de febrero 2020 no se encuentra disponible en el mercado.

Por otra parte, los estudiantes Jairo España y Juan delgado en dirección del ing. Omar A. Gálvez presentan en el 2012 un proyecto en donde ejecutan la construcción de una máquina de termoformado al vacío alimentada por rodillo, haciendo relativamente económica su construcción y con un nivel aceptable de producción gracias a la utilización de materiales de bastante comercialización que cumplían con los requerimientos de diseño y mano de obra aceptable , dicho proyecto fue realizado para la Universidad Industrial de Santander la cual evaluó su proyecto y lo ejecuto brindándole a la Universidad un dispositivo totalmente autóctono y patentado por los dos estudiantes de la facultad de ingeniería mecánica [3].

También los estudiantes Daniel Ferney Forero López y Daniel Fernando Forero Cárdenas de la Fundación Universitaria de los libertadores ubicada en Bogotá para el año 2013 realizaron el cálculo, diseño y simulación de una máquina de termoformado y determinaron que en el proceso de implementar un sistema de vacío la mejor alternativa es el motor tipo By Pass, cuyas características se acoplan perfectamente al requerimiento de la termoformadora, sin incurrir en sobre dimensionamientos y otorgando una ventaja frente a la adaptación de una bomba que garantiza el vacío constante sin tener que encender y apagar el motor; dicha ventaja se ve reflejada en bajos costos de mantenimiento dado el menor número de piezas y la posibilidad de accionar con más frecuencia debido a que está diseñado para tal fin [4].

Así mismo los estudiantes Alexis Cabrera y Marcos Marcillo realizaron el Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio en la Escuela Superior Politécnica del Litoral donde desarrollaron una matriz de ponderación con estos aspectos: Seguridad, didáctico, costo, operatividad, mantenimiento y tamaño que se deben tener en cuenta en el criterio de diseño dando como resultado y de mayor peso el factor seguridad que el equipo debe contar en el momento de su implementación, al mismo tiempo realizaron una carta morfológica que les permitió clasificar las alternativas y evaluarlas en tablas de matriz de decisión con una ponderación teniendo en cuenta los mismos factores en cada uno de los sistemas; obteniendo una selección apropiada en el sistema de calentamiento donde la opción más adecuada es por radiación [5].

Finalmente se evidencia que Colombia no cuenta con empresas o distribuidores que fabriquen o exporten equipos de termoformado dual, ni con los tres principales procesos de termoformado; aquellos equipos que están actualmente en el mercado y en los laboratorios de las instituciones son de tipo industrial (no didáctico) con adaptaciones para ejemplificar su funcionamiento o construidos por los estudiantes.

1.2 Pregunta de investigación

¿Puede un prototipo de máquina de termoformado multifuncional contribuir al desarrollo de competencias de los estudiantes, en los procesos de manufactura y transformación de polímeros de la Fundación Universidad de América?

1.3 Justificación

La construcción del diseño de un prototipo de máquina de termoformado tendrá como principal característica evidenciar los tres principales procesos de termoformado que permiten fabricar la gran mayoría de geometrías; es de gran importancia resaltar que aún no se encuentra implementado a nivel industrial ni pedagógico, de ser implementado el equipo tres en uno de termoformado reducirá costos y espacio significativo frente a equipos que únicamente funcionan con uno de los tres procesos y su precio oscila a partir de los \$ 9'000.000 en empresas como Intertec, Termoformados Osorno, Verpacken, y Maqpack.

Además, le brindara un apoyo al docente permitiéndole una mejor explicación de los fundamentos básicos de la materia, que para este caso en especial sería la transformación de polímeros mediante el proceso de termoformado por vacío, mecánico y por soplado que abarca temática que otros procesos similares permiten explicar, pero por un mayor costo; que a su vez de la posibilidad de ofrecerle al estudiante en formación una mejor experiencia de tipo industrial, al poder visualizar, interactuar y comprobar el proceso de termoformado que facilite la apropiación de los conceptos con mayor claridad de lo que el docente pretende transmitir de manera teórica.

También, busca reducir costos de inversión a la universidad en la adquisición de máquinas y equipos para sus laboratorios y ayudar en la ampliación de estos, de esta forma se desea incentivar a los estudiantes a desarrollar nuevos diseños dentro en la universidad que evidencian sus capacidades y conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, impulsando a la misma a extender las competencias como institución y al estudiante como profesional.

1.4 Delimitación

Este proyecto se desarrollará en la Fundación Universidad de América y pretende realizar el cálculo, diseño y selección apropiada de un prototipo didáctico basado en el proceso de transformación de polímeros mediante el termoformado para tener como finalidad un diseño que puede ser construido e implementado en el laboratorio de procesos de manufactura para las asignaturas que lo requieran.

Basándonos en los objetivos propuestos pretendemos darles cumplimiento a ellos mediante las competencias adquiridas en los cursos de diseño I y II e ingeniería de materiales, también apoyándonos en fuentes de investigación y software especializados en diseño.

Se establecerán los parámetros del equipo y del proceso, además se realizará el análisis de operación, costos de fabricación y diseño, que requiere tener claro la propuesta más optima estructuralmente para permitir el posterior estudio o análisis comparativo por

medio de cotizaciones de materia prima, mano de obra y otros aspectos que involucren la fabricación del equipo directamente con proveedores y empresas que presten los servicios requeridos.

En consecuencia, de la selección de la propuesta más indicada se procederá a realizar el manual instructivo con su respectivo plan de mantenimiento y guías de laboratorio para cada uno de los procesos destacados (tres procesos), a través de las competencias alcanzadas en las asignaturas de mantenimiento predictivo y planeación del mantenimiento que a su vez serán apoyadas por manuales de equipos industriales dándole un enfoque pedagógico, destacando la no construcción de este prototipo.

En conclusión, para su cumplimiento se:

Establecerán los parámetros del equipo y del proceso.

Construirán el manual de operación, guías de laboratorio y manual de mantenimiento.

Elaboraran planos detallados y modelación CAD.

Hará un análisis de costos.

y,

No se realizará su construcción.

No se pretende realizar los tres procesos en simultaneo.

Se trabajará con estos polímeros, poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), poliéster (PET).

1.5 Hipótesis

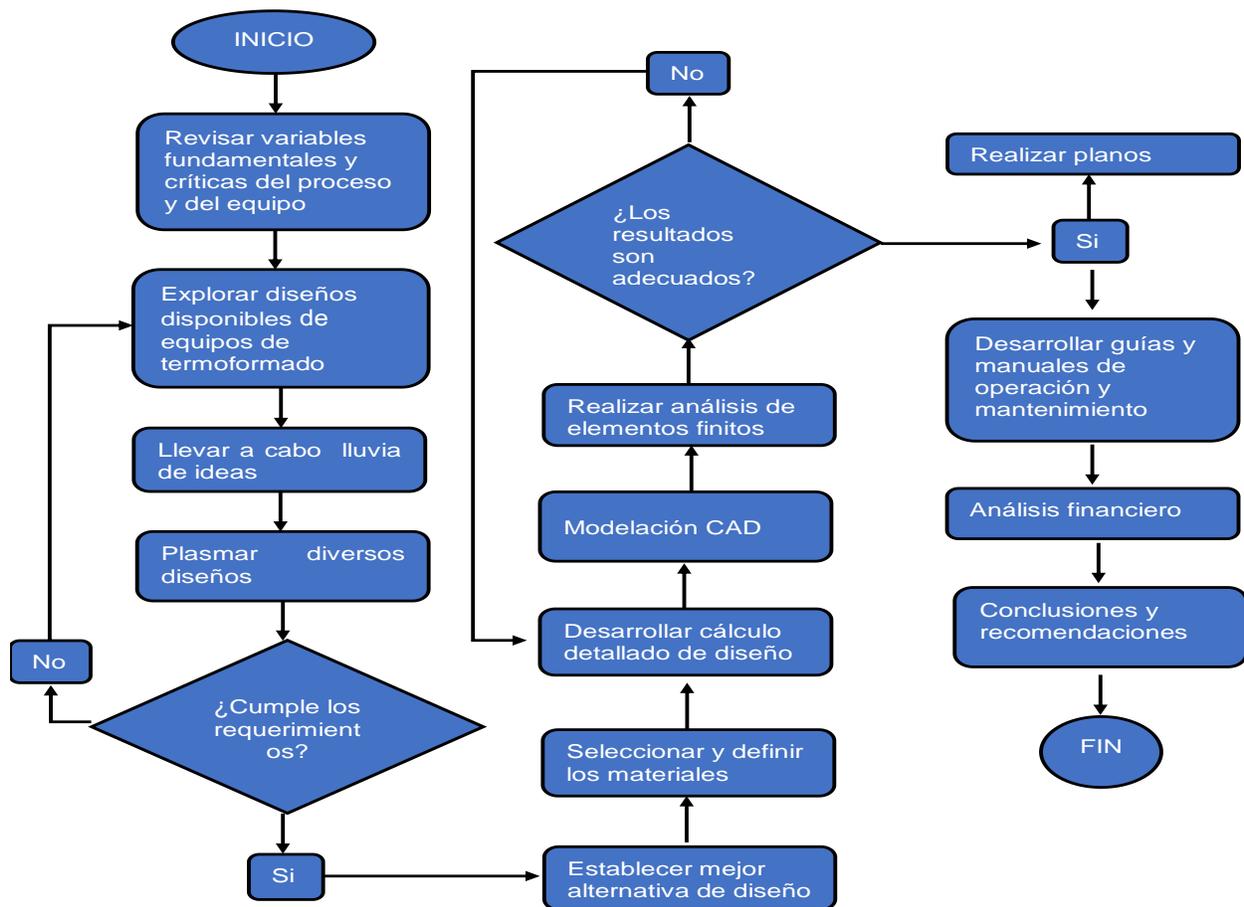
Con base a la problemática evidenciada propondremos la selección de la mejor alternativa de diseño, a través de una matriz de decisión de aspectos relevantes del conjunto de sistemas que conforman la termoformadora, que a su vez estará acompañada del cálculo estructural detallado de manera conceptual y su respectiva selección del perfil y material, apoyándonos en el uso de software de diseño avanzado, y al mismo tiempo de un análisis de costos que permitirá obtener una propuesta adecuada de prototipo de máquina didáctica de termoformado multifuncional.

1.6 Diseño metodológico

Para la evaluación de la propuesta más adecuada se desarrollará un método de ponderación a partir de una matriz y una comparativa de los sistemas con aspectos relevantes para la toma de decisiones apoyándonos a través de la siguiente estructura de diagrama de flujo.

Figura 1.

Diseño metodológico de la termoformadora multifuncional.



Nota. Diseño metodológico para el adecuado desarrollo del proyecto de la termoformadora multifuncional.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Diseñar una máquina de termoformado multifuncional didáctica para el laboratorio de procesos en la Fundación Universidad de América.

1.7.2 Objetivos específicos

- I. Establecer los parámetros básicos y requerimientos funcionales para la máquina de termoformado.
- II. Proponer alternativas de diseño conceptual y funcionamiento, seleccionando la más adecuada.
- III. Desarrollar el diseño en detalle del prototipo que compone la alternativa ya seleccionada.
- IV. Realizar un manual instructivo de operación con sus respectivas guías de laboratorio y mantenimiento de la máquina.
- V. Analizar financieramente la viabilidad del proyecto.

2. PARÁMETROS BÁSICOS Y REQUERIMIENTOS FUNCIONALES PARA LA MÁQUINA DE TERMOFORMADO

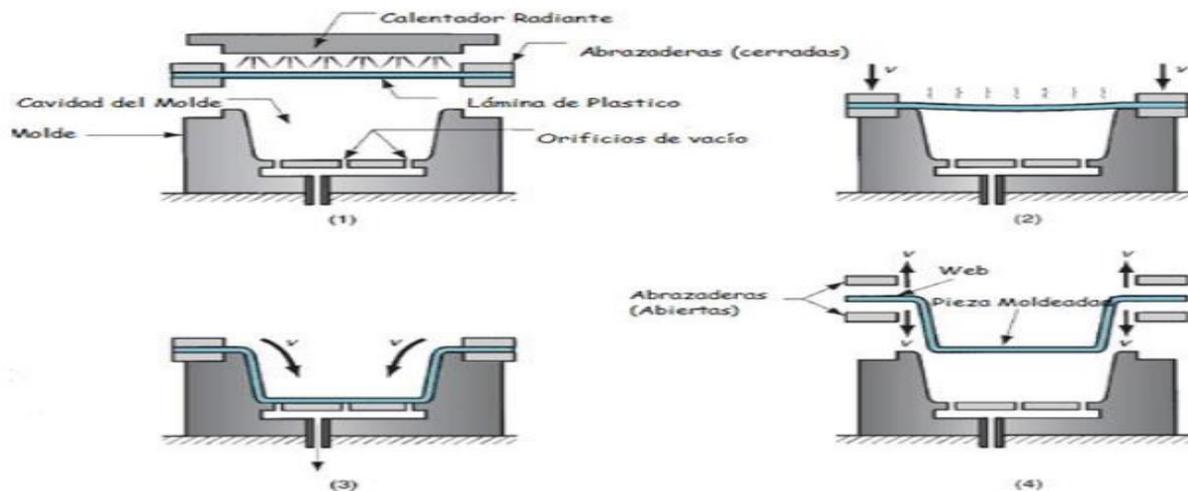
Este proceso de termoformado multifuncional es característico por contar con los tres principales métodos de termoformado los cuales permiten la elaboración de la mayor parte de geometrías que el proceso de termoformado lo permita, dichos métodos se describen a continuación.

2.1 Formado al vacío

Este proceso de termoformado consiste en tomar una lámina de polímero semielaborada, que ha sido previamente calentada por algún medio de transferencia de calor hasta que alcance el punto de estar reblandecida; continuando su proceso se sitúa encima de un molde sellado con la geometría que se quiere obtener y se sujeta para que el aire atrapado pueda ser evacuado por la presión de vacío, lo que ocasionará que la lámina adquiera la forma del molde.

Figura 2.

Formado por vacío.



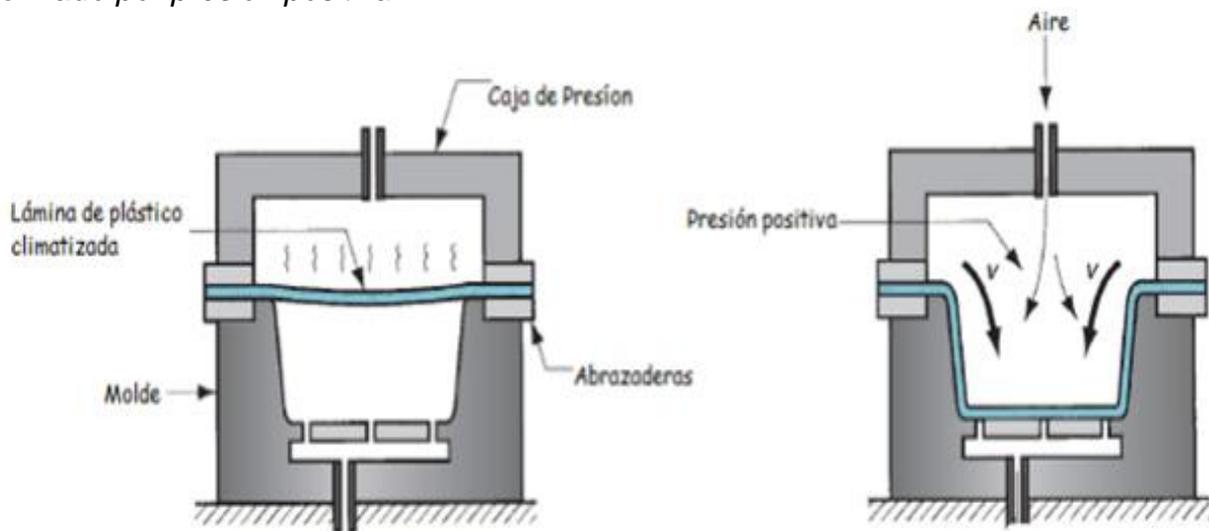
Nota. Se observan las etapas del proceso de formado con ayuda de presión negativa (vacío) Tomado de: L. Martínez y F. Moya “Diseño y construcción de una máquina termoformadora de plástico con control automático para la empresa Miviltech soluciones industriales s.a.” Disponible en <https://n9.cl/nl319>

2.2 Formado por soplado

Este proceso de termoformado es similar al formado por vacío, la principal diferencia radica en el uso de presiones positivas para ayudar al material polimérico a tomar la forma del molde o geometría; también los moldes utilizados en este método requieren orificios para evacuar el aire de forma progresiva para obtener la forma del molde adecuada.

Figura 3.

Formado por presión positiva.



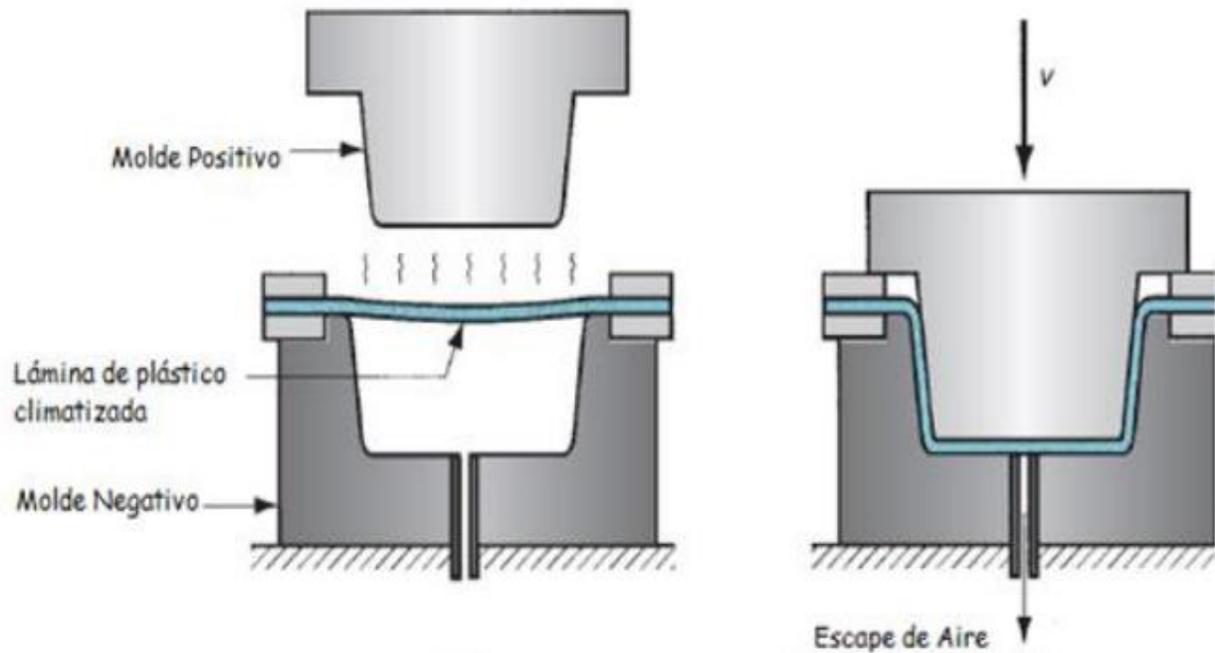
Nota. Se observan las etapas del proceso de formado con ayuda de presión positiva. Tomado de: L. Martínez y F. Moya “Diseño y construcción de una máquina termoformadora de plástico con control automático para la empresa Miviltech soluciones industriales s.a.” Disponible en <https://n9.cl/nl319>

2.3 Proceso de formado mecánico

Este proceso parte de una lámina semi elaborada que ha recibido suficiente calor para ser ablandada y que, posteriormente; por medio de un par de moldes (positivo y negativo) o también llamados molde y contramoldé, se obliga a esta a adquirir la forma del molde debido a la presión que ejercen los dos cuando se juntan por algún mecanismo de desplazamiento [6].

Figura 4.

Formado mecánico.

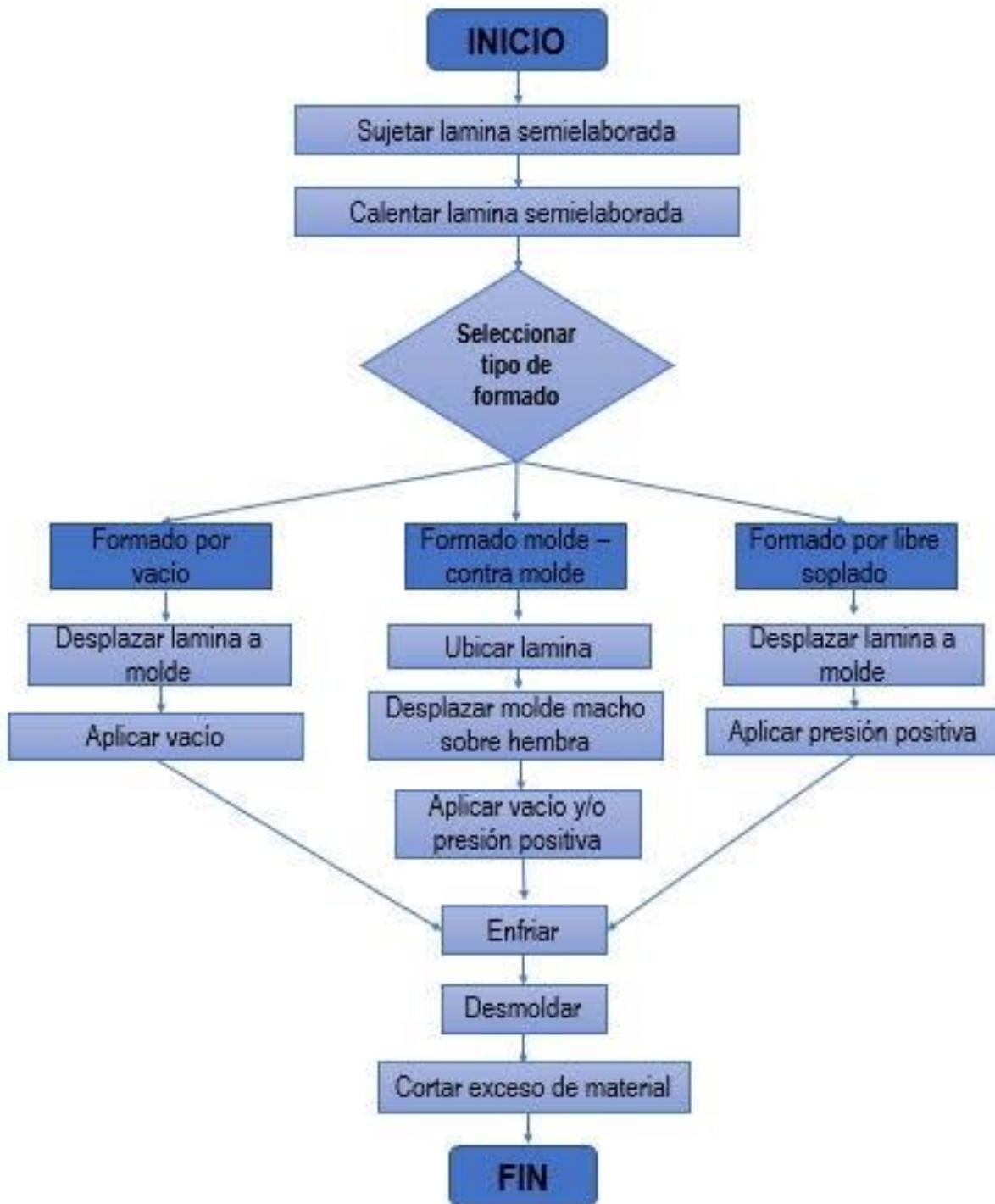


Nota. Se observan las etapas del proceso de formado con molde y contra molde. Tomado de: L. Martínez y F. Moya “Diseño y construcción de una máquina termoformadora de plástico con control automático para la empresa Miviltech soluciones industriales s.a.” Disponible en <https://n9.cl/nl319>

Así que involucrando los tres tipos de formado y representando a través de un diagrama de flujo, el proceso de termoformado multifuncional se describe a continuación:

Figura 5.

Diagrama de flujo del proceso de termoformado multifuncional.



Nota. Diagrama de flujo que representa las etapas que conforman el proceso general de termoformado multifuncional.

2.4 Materia prima

Para el proceso de termoformado se utiliza como materia prima láminas semielaboradas que se obtienen a través del proceso de extrusión y la cuales están compuestas por polímeros termoplásticos que se consiguen de fuentes naturales, derivados del petróleo y por síntesis en laboratorio [7]. Según el manual técnico de termoformado todos los polímeros termoplásticos son aptos para llevar a cabo el proceso de termoformado; al ser estos materiales sometidos a un calentamiento presentan variaciones en algunas de sus propiedades físicas (módulo de elasticidad, dureza y capacidad de resistencia bajo carga).

Para el desarrollo del diseño de la máquina termoformadora se tienen en cuenta los siguientes polímeros: poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC) y poliéster (PET), son actualmente los materiales más utilizados en la industria para este tipo de procesos debido a su alta comercialización en el mercado y sus buenas propiedades.

Inmerso en su proceso existen diversos parámetros y variables que pueden afectar la apariencia, calidad, dimensión y distribución del material en una pieza formada. Cumplir con estos parámetros y evitar dichas variables en el equipo y el proceso de formado puede en ocasiones resolver problemas en la producción.

A través de las siguientes tablas que fueron construidas con información del manual técnico de termoformado elaborado por Plastiglas [1] se describen variables del equipo y el proceso que se presentan con mayor frecuencia.

Tabla 1.

Variables del proceso de termoformado.

Variables del proceso de termoformado		
Variable general	Variable específica	Descripción de variable
Variables del material	Espesor de lámina	Al utilizar un calentamiento con resistencias eléctricas o radiación infrarroja, el descalibre en el espesor del material puede provocar un calentamiento disperejo por lo cual se hacen evidentes las variaciones en la parte formada. En un pre-estirado o formado profundo, es necesario tener en cuenta tolerancias dimensionales cerradas para prevenir que en las zonas muy delgadas se rompa el material por el vacío o presión de aire ejercido. En piezas muy profundas existirá una variación en el espesor del material, esto dependerá del espesor que se utilice, del área y la profundidad máxima de la pieza.
	Pigmentación de la lamina	Para el caso de calentamiento con resistencias eléctricas, los diferentes colores de un mismo material pueden hacer variar la temperatura y los ciclos de calentamiento. En un horno por convección no aplica esta variable.
	Tamaño de lamina	Con el fin de lograr una mejor distribución del material en una pieza muy profunda, es más económico aumentar el tamaño de la hoja en lugar del espesor del material.
	Uniformidad en la temperatura de la lamina	Cuando la temperatura de cualquier material se aumenta, la fuerza de tensión se reduce y por lo tanto la hoja se vuelve más maleable. Los mejores resultados en el termoformado son obtenidos con formados simples o profundos realizados al rango inferior de la temperatura de revenido. Para piezas de alta calidad, es importante que la hoja esté calentada uniformemente al punto de revenido a lo largo y ancho del material. Las hojas que no tienen un calentamiento uniforme, tendrán un formado deficiente: el estiramiento en zonas de temperatura normal resultará mayor que en las que no se logró el reblandecimiento.
Variables en la etapa del pre-estirado	Temperatura en las ayudas mecánicas	Para prevenir que la hoja de material se enfríe durante una operación de pre-estiramiento causando "marcas de enfriamiento" y partes mal formadas, la ayuda mecánica deberá calentarse a una temperatura arriba del punto de distorsión.
	Caja de vacío	En el vacío con retorno y formado libre es muy eficiente emplear una caja de vacío que sea 8 a 12 cm, más larga que la profundidad total de la burbuja formada para prevenir un enfriamiento en el perímetro de la hoja con el molde.
	Temperatura del aire	A menudo es deseable que el aire del sistema sea precalentado; la temperatura del aire en un ambiente que se introduce al sistema puede provocar que la hoja se enfríe, afectando el tamaño y la forma de la pieza. En materiales de espesor delgado, el problema de enfriamiento es más severo.

Nota. Variables que se presentan con mayor frecuencia en el proceso de obtención de geometrías con polímeros a partir de la termoformada; Tomado de: Manual Técnico termoformado, Plastiglas de México S.A. de C.V México 2012.

Tabla 2.

Variables de la máquina de termoformado.

Variables del equipo de termoformado		
Variable general	Variable específica	Descripción de variable
Variables del molde	Orificios o barrenos de vacío	La velocidad de vacío es directamente proporcional a la calidad de la pieza. Un vacío lento provoca que la parte de la hoja donde ocurre el primer contacto con el molde se enfríe más rápido que el resto. El resultado es la obtención de secciones muy delgadas de la pared o piezas incompletas. Para un rápido desplazamiento de aire, se recomienda utilizar barrenos de vacío con medidas entre 1/8" y 1/4".
	Superficie del molde	Un acabado mate en el molde, dará un acabado opaco en el material; un acabado muy pulido (acabado espejo) dará por consecuencia una pieza brillante.
	Temperatura del molde	Influye en la apariencia de la pieza formada, en la duración de los ciclos de formado y el tamaño de la pieza. El encogimiento final de una pieza termoformada dependerá de que la temperatura aproximada del molde sea similar al coeficiente de expansión térmica del material.
Variables en las ayudas mecánicas	Materiales de las ayudas	Para buenos resultados la ayuda mecánica deberá tener excelentes cualidades de transferencia de calor y de resistencia continua y prolongada a altas temperaturas. El aluminio es uno de los mejores. Para corridas cortas o prototipos será mejor una madera dura y para mantener a la madera sin que se reseque demasiado y se cuartee por el calor, se deberá engrasar frecuentemente la superficie.
	Forma de la ayuda mecánica	La ayuda deberá adaptarse muy cercanamente a la forma de la cavidad del molde, pero deberá ser de 10 a 20% más pequeña en el largo y ancho (o diámetro). Cuando estas dimensiones sean de 12 cm o más, las ayudas pequeñas deberán permitir al menos 1/4" de claro entre la parte final y la ayuda, para prevenir lo más posible irregularidades en el espesor del material.
		Cuando el molde sea en forma de canales (lámina acanalada) con cambios de planos bruscos a zonas estrechas, es importante que la ayuda sea hecha con postizos que entren en los canales del molde. Estos postizos ayudarán a depositar más material con lo cual se incrementará el espesor en un área particular. Para cajas en el molde, se deberá aplicar la misma proyección en la ayuda. En el caso de depresiones profundas en las paredes del molde, es deseable incorporar un mecanismo auxiliar para llevar más material en esa zona, todas las esquinas serán suavizadas con radios generosos.
	Temperatura de la ayuda	Deberá mantenerse justamente abajo de la temperatura de formado de la hoja. Se pueden tener bajas temperaturas de trabajo en la ayuda, si la temperatura se va hacia abajo, las marcas de enfriamiento se harán más visibles.
		Así como no es tan crítico un control estricto de la temperatura del molde, en la ayuda se deberá mantener sin variación un calentamiento uniforme máximo de 10° C. Con una adecuada regulación de temperatura.
	Superficie de la ayuda	Una superficie suave con radios bien pulidos y libres de polvo y basuras producirán buenas piezas.
Altura de la ayuda	Una ayuda mecánica efectiva es aquella que es más larga que la profundidad de la cavidad del molde, ya que así podrá regular su ajuste.	
Velocidad de vacío en la ayuda	El incremento en la velocidad de la ayuda eleva la capacidad de la compresión de aire en la cavidad del molde. La capacidad del sistema de vacío y su duración en relación a la carrera de la ayuda afecta la presión en la cavidad del molde. Normalmente el vacío en el ciclo deberá empezar al mismo tiempo en que la ayuda toca el material.	

Nota. Variables que se presentan con mayor frecuencia el equipo de termoformado; Tomado de: Manual Técnico termoformado, Plastiglas de México S.A. de C.V México 2012.

2.5 Parámetros del proceso

Durante las pruebas en máquina puede ser necesario modificar los valores de los parámetros de termoformado.

Estos parámetros se tienen en cuenta la mayoría cuando su fin es producir geometrías en grandes masas para nuestro caso solo se tienen en cuenta los más importantes y que se incluyen dentro del proceso.

2.5.1 Tiempo de calefacción

Tiempo que dura el ciclo de calefacción, desde que los calefactores cubren la plancha hasta que se retiran.

2.5.2 Temperatura máxima de calentamiento

Temperatura máxima que alcanzará la plancha, medida en el centro de la misma. Cuando se alcance esta temperatura, finalizará el ciclo de calentamiento y los calefactores se retirarán.

2.5.3 Tiempo de vacío

Duración del periodo durante el que se aplica vacío al artículo a través de los canales del molde.

2.5.4 Tiempo de compresión

Duración del periodo durante el que se aplica presión positiva al artículo.

2.5.5 Tiempo de refrigeración

Tiempo durante el cual los ventiladores permanecen encendidos y enviando chorros de aire sobre el artículo.

2.5.6 Recorrido del molde

Recorrido que requiere el molde macho para fabricar la geometría. [8]

3. ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Para la construcción del diseño se plantearán algunas opciones en los sistemas que conforman la máquina con el fin de evidenciar sus principales características de funcionamiento y poder así mediante un método de calificación cuantitativo y/o cualitativo escoger las mejores alternativas que se adapten a los requerimientos del proceso en cuanto a su funcionamiento.

3.1 Requerimientos de la máquina

Los parámetros y/o requerimientos de la máquina multifuncional tienen un enfoque didáctico dentro de la Fundación Universidad de América, es por eso que se debe contemplar el hecho de que esta funcionará, de ser implementada, dentro de un laboratorio para estudiantes con baja experticia.

- ✓ Debe ser compacta para que sus dimensiones no impidan el desplazamiento y ocupen demasiado espacio dentro de las instalaciones de la Universidad.
- ✓ La máquina debe garantizar una seguridad óptima para el operario.
- ✓ Deberá incluir los tres procesos de termoformado
- ✓ Se debe evidenciar de manera didáctica los conceptos del proceso de termoformado.
- ✓ Debe ser un diseño económico.
- ✓ Y deberá trabajar con las siguientes especificaciones para los tipos de polímeros con los cuales va operar la máquina.

Tabla 3.

Propiedades de los polímeros a utilizar en el proceso de formado.

Material	Poliestireno (PS)	Cloruro de polivinilo (PVC)	Poliéster (PET)
Temperatura de formado (°C)	145-180	160-200	145-175
Espesor lámina (mm)	3		
Tamaño aprovechable de la lámina (cm)	40 x 40		

Nota. Caracterización de los polímeros a temperatura, dimensión y espesor en los cuales opera la máquina de termoformado multifuncional; Tomada de: E. Espinoza Correa, *Termoformado de geometrías complejas*. Trabajo fin de master Facultad de ingenierías. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España. Disponible en <https://n9.cl/3f5g>.

3.2 Matriz de priorización

Para la construcción de la matriz de priorización se establecen diferentes criterios de diseño los cuales surgen de los requerimientos de la máquina y así mismo permiten elegir entre un conjunto de alternativas aquellas que sean más apropiadas para la implementación del proyecto.

3.2.1 Criterios de diseño

- ✓ **Tamaño:** Hace referencia a las dimensiones físicas que ocupara la máquina.
- ✓ **Seguridad:** Cuando de seguridad se habla es importante transmitir confiabilidad al operario, evitando el riesgo de posibles accidentes.
- ✓ **Operatividad:** Se trata de la facilidad de manipulación que le puede brindar el conjunto de todos los sistemas.
- ✓ **Mantenimiento:** Durabilidad en lapsos de mantenimiento y facilidad con la que se realicen.
- ✓ **Costo:** Es la cantidad de dinero que requiere la fabricación, compra e implementación del sistema.
- ✓ **Disponibilidad:** Hace referencia a la alta comercialización de los sistemas en el mercado.

La dinámica de la matriz consiste en comparar los diversos criterios que precisamos con anterioridad, para así definir el orden de importancia o peso que ocuparan en los sistemas de la máquina; gracias a la información obtenida por Ingenioempresa [9] dicha matriz se debe evaluar respectivamente:

- 10:** Si el criterio de columna es mucho más importante que el criterio de fila
- 5:** Si el criterio de columna es más importante que el criterio de fila.
- 1:** Si ambos criterios son igual de importantes.
- 0.2:** Si el criterio de columna es menos importante que el criterio de fila.
- 0.1:** Si el criterio de columna es mucho menos importante que el criterio de fila

Tabla 4.

Criterios de diseño.

CRITERIOS	Tamaño	Seguridad	Operatividad	Mantenimiento	Costo	Disponibilidad	Total	Ponderado %
Tamaño		0,1	0,2	0,2	5	0,2	5,7	6,86
Seguridad	10		5	5	10	10	40	48,13
Operatividad	5	0,2		5	5	5	20,2	24,31
Mantenimiento	5	0,2	0,2		1	1	7,4	8,90
Costo	0,2	0,1	0,2	1		1	2,5	3,01
Disponibilidad	5	0,1	0,2	1	1		7,3	8,78
Total							83,1	

Nota. Matriz de priorización para los aspectos definidos con anterioridad, precisa para obtener porcentajes de importancia.

3.2.2 Selección de alternativas

Ya con los valores de priorización asignados a cada criterio, se realiza una estimación numérica entre los rangos de 1 a 5 asignados de forma cualitativa teniendo en cuenta una escala apropiada para las funciones que desarrollan los sistemas y se da, de la siguiente manera:

✓ Bueno	5
✓ Medio alto	4
✓ Medio	3
✓ Medio bajo	2
✓ Malo	1

Cabe resaltar que el planteamiento de las alternativas se realiza a los principales sistemas que conforman la máquina los cuales son:

- ✓ Sistemas de calentamiento.
- ✓ Sistemas de enfriamiento.
- ✓ Sistemas de presión.
- ✓ Sistemas de desplazamiento.
- ✓ Sistema de molde y contra molde.
- ✓ Estructura.

A continuación, se incluyen tablas que caracterizan los principales sistemas que hacen parte de la máquina de termoformado multifuncional; junto a las matrices de decisión. Dichas tablas fueron construidas a partir de información obtenida en el manual técnico de termoformado Plastiglas [1] y conocimientos propios adquiridos a lo largo de la carrera.

3.2.2.a Sistema de calentamiento.

Tabla 5.

Características de alternativas en el sistema de calentamiento.

Alternativas de sistemas	Características importantes del sistema
Calentamiento por contacto	La lámina semielaborada de plástico está en contacto con una placa caliente de metal; su uso se ve reflejado especialmente en la producción en serie de geometrías pequeñas y espesores mínimos.
Calentamiento por inmersión	Se sumerge la lámina de plástico en algún líquido que transfiera el calor lo más uniforme posible y rápidamente, su uso está restringido cuando se requieren láminas muy grandes o muy gruesas, ya que la manipulación y la limpieza de la pieza se torna difícil.
Calentamiento por convección	Son ampliamente usados porque proporciona un calentamiento uniforme y pueden en cierto grado, secar algunos materiales que contengan porcentaje de humedad. Proveen un gran margen de seguridad con respecto a las variaciones en tiempo de los ciclos de termoformado.
Calentamiento por radiación infra roja	Su mayor diferencia con respecto a los métodos anteriores está en que puede proporcionar calentamiento instantáneo y, por lo tanto, sus ciclos de exposición son muy cortos.
Calentamiento interno	No tiene suficiente aplicación, ya que los equipos tienen un elevado costo y no son aplicables a todos los termoplásticos; además los tiempos de enfriamiento son demasiado largos, pero es aplicable a los procesos de formado donde se requiere calentamiento localizado en una zona específica del material.

Nota. Características que presentan las diferentes alternativas que pueden conformar el sistema de calentamiento de la máquina de termoformado multifuncional.

Tabla 6.

Matriz de decisión del sistema de calentamiento.

Matriz de decisión		Ponderación (%)	Alternativas					
			Contacto		Convección		Radiación	
			Nota	%*N	Nota	%*N	Nota	%*N
Criterios	Tamaño	5,7	3	17,1	1	5,7	5	28,5
	Seguridad	40	3	120	5	200	4	160
	Operatividad	20,2	4	80,8	3	60,6	4	80,8
	Mantenimiento	7,4	3	22,2	2	14,8	4	29,6
	Costo	2,5	3	7,5	2	5	4	10
	Disponibilidad	7,3	4	29,2	3	21,9	5	36,5
Total				277		308		345

Nota. Matriz de decisión para seleccionar la alternativa más adecuada del sistema de calentamiento de la máquina de termoformado multifuncional.

Para el sistema de calentamiento a través de la matriz de decisión, donde se tienen en cuenta los criterios que la máquina requiere para su diseño, se obtiene que el sistema que mejores cualidades presenta, es por radiación el cual su implementación se da a través de resistencias eléctricas tubulares.

Los sistemas por inmersión y calentamiento interno están restringidos a características específicas del proceso y su aplicación es mínima, ya que no son efectivos en todos los termoplásticos haciendo su disponibilidad baja y costos elevados.

3.2.2.b Sistema de enfriado.

Tabla 7.

Características de alternativas en el sistema de enfriado.

Alternativas de sistemas	Características importantes del sistema
Enfriamiento por conducción	Se realiza a través de la pieza en contacto con el molde que cuenta con ductos de recirculación de agua y puede mejorar su eficiencia si el molde es de metal.
Enfriamiento por convección	Lo más común es utilizar ventiladores eléctricos para enfriar la pieza; presentando ventajas al enfriar la pieza en el molde, la desventaja recae en que la corriente de aire no será suficiente para enfriar el molde en cada ciclo con lo cual éste se excederá de calor, interfiriendo con el ciclo normal de calentamiento.

Nota. Características que presentan las diferentes alternativas que pueden conformar el sistema de enfriado de la máquina de termoformado multifuncional.

Tabla 8.

Matriz de decisión del sistema de enfriamiento.

Matriz de decisión		Ponderación (%)	Alternativas			
			Conducción		Convección	
			Nota	%*N	Nota	%*N
Criterios	Tamaño	5,7	3	17,1	4	22,8
	Seguridad	40	4	160	4	160
	Operatividad	20,2	3	60,6	4	80,8
	Mantenimiento	7,4	2	14,8	4	29,6
	Costo	2,5	2	5	5	12,5
	Disponibilidad	7,3	3	21,9	4	29,2
Total				279,4		334,9

Nota. Matriz de decisión para seleccionar la alternativa más adecuada en el sistema de enfriamiento de la máquina de termoformado multifuncional.

Para las alternativas propuestas en el sistema de enfriamiento, se obtiene a través de la matriz de decisión que el sistema de enfriamiento por convección es el más indicado para proporcionar de manera correcta el cambio de temperatura que requiere la pieza.

3.2.2.c Sistema de presión.

Tabla 9.

Características de alternativas en el sistema de presión.

Alternativas de sistemas	Características importantes del sistema
Presión negativa (Vacío)	Su función recae en evacuar el aire del molde, causando esa presión negativa sobre la superficie de la hoja y, por lo tanto, la presión atmosférica natural cederá para forzar a la hoja calentada a ocupar los espacios vacíos.
Presión positiva (Soplado)	Al incluir únicamente la presión positiva en el proceso será más difícil obtener un sellado satisfactorio de la pieza, para fortalecer el sistema de presión el equipo de formado a presión deberá ser más fuerte que el de vacío.

Nota. Características que presentan las alternativas que van a conformar el sistema de presión de la máquina de termoformado multifuncional.

Tabla 10.

Matriz de decisión del sistema de presión.

Matriz de decisión		Ponderación (%)	Alternativas			
			Presión positiva		Presión negativa	
			Nota	%*N	Nota	%*N
Criterios	Tamaño	5,7	4	22,8	4	22,8
	Seguridad	40	3	120	3	120
	Operatividad	20,2	3	60,6	4	80,8
	Mantenimiento	7,4	4	29,6	4	29,6
	Costo	2,5	3	7,5	4	10
	Disponibilidad	7,3	4	29,2	4	29,2
Total				269,7		292,4

Nota. Matriz de decisión para seleccionar la alternativa más adecuada para el sistema de enfriamiento de la máquina de termoformado multifuncional.

En el caso del sistema de presión tenemos dos alternativas diferentes donde a pesar que la presión negativa es la que obtiene el mejor resultado; pero debido a que el equipo multifuncional cuenta con formado por vacío y presión positiva es necesario implementar los dos sistemas para que trabajen de forma tanto individual como en conjunto y obtener piezas de mayor calidad.

3.2.2.d Sistema de desplazamiento.

Tabla 11.

Características de alternativas en el sistema de desplazamiento.

Alternativas de sistemas	Características importantes del sistema
Mecánico	Es el sistema más simple y menos costoso para realizar el desplazamiento del molde hacia la pieza o viceversa se realiza de forma manual por el operario.
Neumático	Este método requiere de la ayuda de aire comprimido que se suministra comúnmente por un compresor y un sistema de tuberías y válvulas que facilitan el trabajo del operario y aumentan la producción; este método no mueve grandes cargas.
Hidráulico	Es el método que brinda mayor exactitud gracias a que utiliza fluidos con mayor incompresibilidad, pero presenta desventajas debido a sus elevados costos.

Nota. Características que presentan las diferentes alternativas que pueden conformar el sistema de desplazamiento de la máquina de termoformado multifuncional.

Tabla 12.

Matriz de decisión para el sistema de desplazamiento.

Matriz de decisión		Ponderación (%)	Alternativas					
			Mecánico		Neumático		Hidráulico	
			Nota	%*N	Nota	%*N	Nota	%*N
Criterios	Tamaño	5,7	4	22,8	3	17,1	3	17,1
	Seguridad	40	3	120	4	160	4	160
	Operatividad	20,2	4	80,8	4	80,8	4	80,8
	Mantenimiento	7,4	5	37	4	29,6	2	14,8
	Costo	2,5	5	12,5	4	10	3	7,5
	Disponibilidad	7,3	5	36,5	4	29,2	3	21,9
Total				310		327		302,1

Nota. Matriz de decisión para seleccionar la alternativa más adecuada para el sistema de desplazamiento de la máquina de termoformado multifuncional.

El sistema de desplazamiento que presenta un mayor beneficio para el diseño de la máquina de termoformado multifuncional es el sistema Neumático sin embargo no se descarta la posibilidad de complementar el sistema con ajustes combinados mecánicos-neumáticos.

3.2.2.e Estructura.

Tabla 13.

Características de alternativas en el sistema estructural.

Alternativas de sistemas	Características importantes del sistema
Rígida	Tienen un alto nivel de resistencia y durabilidad ante distintos tipos de esfuerzos, lo que representa una larga vida de la estructura; pero el peso y el tamaño que toma el equipo pueden representar algunas limitaciones.
Desmontable	Se caracteriza por su fácil desmontaje ya sea para traslado o para fines de mantenimiento, permite la unión de diferentes materiales y su costo operativo menor, pero tiende a concentrar esfuerzos en las uniones, se puede aflojar y presentar corrosión con mayor facilidad.

Nota. Características que presentan las diferentes alternativas de diseño estructural que pueden conformar la máquina de termoformado multifuncional.

Tabla 14.

Matriz de decisión para la estructura.

Matriz de decisión		Ponderación (%)	Alternativas			
			Desmontables		Rígida	
			Nota	%*N	Nota	%*N
Criterios	Tamaño	5,7	5	28,5	3	17,1
	Seguridad	40	4	160	4	160
	Operatividad	20,2	3	60,6	4	80,8
	Mantenimiento	7,4	4	29,6	5	37
	Costo	2,5	4	10	4	10
	Disponibilidad	7,3	4	29,2	4	29,2
Total				317,9		334,1

Nota. Matriz de decisión para seleccionar la alternativa más adecuada para la estructura de la máquina de termoformado multifuncional.

Para la estructura que se incluye dentro del proyecto, se obtiene la estructura rígida como la más adecuada, en la cual se contemplan parámetros de manipulación dentro y fuera de las instalaciones.

3.2.2.f Subsistemas. Dentro de la máquina de termoformado multifuncional se encuentran algunos subsistemas que hacen parte de ella, pero presentan similitudes con otros sistemas, gran variación o número de alternativas y no permiten o requieren la construcción de una matriz de decisión específica.

3.2.2.g Sistema eléctrico y electrónico (control automatizado). Para el sistema de control automatizado varía en el diseño que se requiera implementar sin embargo incorporar sistemas eléctricos y electrónicos permite obtener piezas con mejores acabados, ya que representa mayor exactitud y nivel de producción facilitando así el uso de la máquina.

3.2.2.h Sistema molde y contra molde. En el caso del sistema de molde y contra molde está conformado por dos moldes (hembra y macho) y un sistema de desplazamiento que presenta las mismas características en las alternativas, mecánica, neumática e hidráulica.

3.2.2.i Molde. Dependerá de la técnica de termoformado que se desee emplear, pero se debe tener en cuenta los siguientes criterios:

1. La forma y dimensiones de la pieza
2. La apariencia deseada.
3. La técnica de termoformado.

Y las siguientes características que se presentan

- ✓ Un adelgazamiento en el espesor del material, esto dependerá más que nada de la forma, tamaño y técnica utilizada considerando que el adelgazamiento en el espesor del material es directamente proporcional a la altura de la pieza.
- ✓ Un ángulo de salida de moldeo entre 3° y 5°.
- ✓ Una contracción en la pieza del 0.6 al 1% al enfriar.
- ✓ Por lo general, la superficie de la pieza termoformada será lisa, aunque es posible obtener algunas texturas.

- ✓ En el diseño de la pieza es conveniente incluir radios grandes; es posible obtener aristas, pero podrán causar rasgaduras en el material.

3.2.3 Identificación de aspectos e impactos ambientales

Para la identificación de aspectos e impactos ambientales del proyecto se construye una matriz a través de los siguientes parámetros propuestos por Vicente Conesa Fernández:

- ✓ **Naturaleza:** Se refiere a si el orden del impacto generado es de carácter positivo o negativo.
- ✓ **Extensión (EX):** Se refiere al área de influencia del impacto en relación con el entorno del proyecto.
- ✓ **Intensidad (I):** Representa la incidencia de la acción causal sobre el factor impactado en el área en la que se produce el efecto.
- ✓ **Momento (MO):** El plazo de manifestación del impacto se refiere al tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto sobre el medio considerado.
- ✓ **Persistencia (PE):** Se refiere al tiempo que, supuestamente, permanecería el efecto desde su aparición y, a partir del cual el factor afectado retornaría a las condiciones iniciales previas a la acción por medios naturales, o mediante la introducción de medios naturales, o mediante la introducción de medidas correctivas.
- ✓ **Reversibilidad (RV):** Se refiere a la posibilidad de construcción del factor afectado por el proyecto, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la acción, por medios naturales, una vez aquella deja de actuar sobre el medio.
- ✓ **Sinergia (SI):** Este atributo contempla el reforzamiento de dos o más efectos simples. La componente total de la manifestación de los efectos simples, provocados por

acciones que actúan simultáneamente, es superior a la que cabría de esperar de la manifestación de efectos cuando las acciones que las provocan actúan de manera independiente no simultánea.

- ✓ **Acumulación (AC):** Este atributo da idea del incremento progresivo de la manifestación del efecto, cuando persiste de forma continuada o reiterada la acción que lo genera.
- ✓ **Efecto (EF):** Este atributo se refiere a la relación causa efecto, o sea a la forma de manifestación del efecto sobre un factor, como consecuencia de una acción.
- ✓ **Periodicidad (PR):** La periodicidad se refiere a la regularidad de la manifestación del efecto, bien sea de manera cíclica o recurrente (efecto periódico), de forma impredecible en el tiempo (efecto irregular), o constante en el tiempo (efecto continuo).
- ✓ **Recuperabilidad (MC):** Se refiere a la posibilidad de reconstrucción, total o parcial, del factor afectado como consecuencia del proyecto, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la actuación, por medio de la intervención humana (introducción de medidas correctivas). [10]

Las características que presenta esta matriz se pueden encontrar en el documento de evaluación de impacto ambiental matrices simples e interactivas departamento de ambiental de la Fundación Universidad de América y muestra a continuación la respectiva valoración que ocupa cada parámetro.

Tabla 15.

Caracterización y forma del desarrollo de la valoración de cada parametro ambiental.

Característica del Impacto		Valoración
Efecto	secundario	1
	Primario	4
Magnitud/Intensidad	Baja	1
	Media Baja	2
	Media Alta	3
	Alta	4
	Muy Alta	8
	Total	12
Extensión	Puntual	1
	Parcial	2
	Extenso	4
	Total	8
Momento	Inmediato	4
	Corto Plazo (menos de 1 año)	4
	Mediano plazo (1-5 años)	2
	Largo plazo (mas de 5 años)	1
Persistencia	Fugaz	1
	Temporal (entre 1 y 10 años)	2
	Permanente (duración mayor a 10 años)	4
Reversibilidad	Corto Plazo (menos de 1 año)	1
	Mediano plazo (1-5 años)	2
	Irreversible (mas de 10 años)	4
Recuperabilidad	Total e inmediata	1
	Total a mediano plazo	2
	Parcial (Mitigación)	4
	Irrecuperable	8
Sinergia	Sobre un factor	1
	Sinergismo Moderado	2
	Altamente sinérgico	4
Acumulación	No existen efectos acumulativos	1
	Existen efectos acumulativos	4
Periodicidad	Continuos	4
	Periódicos	2
	Discontinuos	1

Nota. Valoración y caracterización de los parametros para evaluar la matriz de aspectos e impactos ambientales, Tomado de: Evaluación de impacto ambiental matrices simples e interactivas, Fundación Universidad de América 2021.

Vicente Conesa Fernández expresa la “importancia del impacto” considerando la siguiente ecuación:

Ecuación 1.

Importancia del impacto.

$$I = \pm(3\text{Intensidad} + 2\text{Extensión} + \text{Momento} + \text{Persistencia} + \text{Reversibilidad} + \text{Sinegismo} + \text{Acumulación} + \text{Efecto} + \text{Periodicidad} + \text{Recuperabilidad})$$

Y clasifica los rangos de importancia del impacto que causa el proyecto positiva y negativamente de la siguiente manera:

Tabla 16.

Jerarquización de impactos ambientales.

Jerarquización de impactos ambientales (negativos)			
Irrelevante	Moderado	Severo	Crítico
>-20	-21 a -31	-32 a -42	<-43
Jerarquización de impactos (positivos)			
Poco significativo	Moderado	Significativo	Muy significativo
<20	21 a 31	32 a 42	>43

Nota. Jerarquización de aspectos positivos y/o negativos con sus respectivos rangos de clasificación de impactos medio ambientales.

Dentro de la matriz se tienen en cuenta dos procesos, que constan del impacto que puede generar la fabricación de la máquina y la elaboración de las geometrías en la máquina multifuncional como se muestra a continuación:

Figura 6.

Matriz de aspectos e impactos ambientales del proceso de termoformado.

Proceso	Actividad	Aspectos ambientales	Impactos ambientales	Naturaleza	Efecto(EF)	Magnitud(MA)	Extensión (EX)	Momento(MO)	Persistencia(PE)	Reversibilidad(RV)	Recuperabilidad(MC)	Sinergia(SI)	Acumulación(AC)	Perforicidad(PE)	Importancia	Relevancia de impacto ambiental
P r o c e s o d e t e r m o f o r m a d o	Fabricación de la maquina termoformadora	Consumo de energía eléctrica.	• Agotamiento de recursos naturales. • Contaminación ambiental. • Efecto invernadero.	-	4	4	4	2	2	2	4	2	4	4	-44	CRITICO
		Generación de material particulado.	• Afectación en la salud de los trabajadores. • Deterioro de la calidad del aire.	-	1	3	2	1	2	2	4	2	4	2	-23	MODERADO
		Generación de olores.	• Afectaciones en la salud del trabajador y la fauna.	-	4	3	2	4	1	4	4	2	4	2	-30	MODERADO
		Consumo de agua.	• Agotamiento de recursos naturales	-	1	2	2	1	1	1	2	1	1	2	-14	IRRELEVANTE
		Emisión de vapores contaminantes.	• Afectación en la salud de los trabajadores. • Deterioro de la calidad del aire.	-	4	3	2	4	2	2	4	2	4	2	-29	MODERADO
		Generación de ruido.	• Contaminación auditiva • Desplazamiento de fauna	-	1	3	2	4	2	4	2	2	1	2	-23	MODERADO
		Generación de residuos sólidos.	• Sobrepresión en relleno sanitario.	-	2	2	2	2	2	2	2	2	1	4	4	-23
	Elaboración de geometrías en el proceso de termoformado	Consumo de energía eléctrica.	• Agotamiento de recursos naturales. • Contaminación ambiental.	-	4	3	2	1	2	2	4	2	1	2	-23	MODERADO
		Emisión de vapores contaminantes.	• Afectación en la salud de los trabajadores. • Deterioro de la calidad del aire.	-	4	3	2	4	2	2	4	2	4	2	-29	MODERADO
		Generación de ruido.	• Contaminación auditiva • Desplazamiento de fauna	-	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	-13	IRRELEVANTE
Generación de residuos sólidos.		• Sobrepresión en relleno sanitario. • Afectación en la flora y fauna.	-	4	2	1	1	1	4	2	1	4	2	-22	MODERADO	
Utilización de residuos sólidos.		• Mitigación en sobre presión de relleno sanitario.	+	1	2	1	4	2	2	2	2	1	2	19	IRRELEVANTE	

Nota. Matriz de aspectos e impactos ambientales en el proceso de fabricación de la máquina de termoformado multifuncional y la elaboración de geometrías con polímeros. Como se designó anteriormente se divide el proyecto en la fase de construcción de la máquina multifuncional y la fase de producción o elaboración de geometrías.

Para la fase de construcción se encuentran actividades que involucran equipos de metalmecánica, pintura y mecánica básica general, que al ser evaluados de forma cualitativa y cuantitativa a través de conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, y basándose en los parámetros definidos por Vicente Conesa: se evidencia que el aspecto que impacta de manera crítica es el excesivo consumo de energía eléctrica que requieren estos equipos para realizar de manera correcta su funcionamiento; por ende el recurso que mayor impacto negativo recibe es el agua; pero asumiendo que el diseño del proyecto que se va a realizar no es para grandes masas este impacto se reduce en gran manera por lo cual no representaría una afectación en dicho recurso.

En el caso de ser implementada la máquina multifuncional en la Fundación Universidad de América tendría efectos relativamente moderados que se pueden controlar y mitigar en un corto lapso de tiempo, ya que el factor con mayor valoración negativa es la emisión que produce el calentamiento de los polímeros donde un buen sistema de ventilación y elementos de seguridad adecuados para su operación contrarrestaran efectos negativos en los operarios y las instalaciones; además este proceso que está enfocado de manera didáctica también cuenta con la facilidad de re utilizar el exceso de material a través de la industria de la extrusión de polímeros.

4. DESARROLLAR EL DISEÑO EN DETALLE DEL PROTOTIPO QUE COMPONE LA ALTERNATIVA YA SELECCIONADA

4.1 Sistema de calentamiento

Para el sistema de calentamiento se determina el uso de resistencias eléctricas tubulares con la finalidad de conseguir un calentamiento uniforme en la totalidad de la lámina de forma fácil, segura y económica; utilizando aislamiento térmico para garantizar la correcta dirección del calor que se presente transferir.

4.1.1 Análisis de transferencia de calor

Se requiere elevar la temperatura de la lámina de polímero desde su temperatura ambiente T_a , hasta su temperatura de formado T_b . Para ello es necesario conocer la energía requerida para lograr este gradiente de temperatura [5], la cual está dada por la siguiente ecuación de energía requerida.

Ecuación 2.

Energía que requiere el polímero por unidad de tiempo.

$$Q_L = \frac{m \times C_p \times (T_b - T_a)}{\Delta_t}$$

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

Para hallar la masa se requiere conocer el volumen aprovechable o deformable de las láminas de polímeros a calentar y eso se hace a través de la fórmula de volumen de un cubo.

Ecuación 3.

Volumen que ocupa la lámina de polímero.

$$V = \text{Longitud} \times \text{Ancho} \times \text{Espesor}$$

Remplazando.

$$V = 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 0,3 \text{ cm} = 480 \text{ cm}^3 \approx 4,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Nota. Cabe resaltar que el volumen a calentar es el mismo para todas las láminas, ya que cuentan con las mismas dimensiones a formar.

La ecuación de masa (m) viene dada de la siguiente manera:

Ecuación 4.

Masa de los polímeros.

$$m = d \times V$$

Donde d hace referencia a la densidad y V al volumen de las láminas.

En la siguiente tabla se definen las propiedades que se pretenden conocer para cada tipo de polímero y que se construye con información de sus propiedades suministrada por Goodfellow [11] y cálculos obtenidos de la **ecuación 4**.

Tabla 17.

Propiedades del polímero y proceso de calentamiento de la termoformadora.

Propiedades	Poliestireno (PS)	Cloruro de polivinilo (PVC)	Poliéster (PET)
C_p J/Kg× K	1200	1046	1350
m (Kg)	0,504	0,72	0,5904
T_b (k)	453,15	473,15	448,15
T_a (k)	287,15	287,15	287,15
Δ_t (s)	60	60	60

Nota. Propiedades para el cálculo de la energía requerida en cada uno de los polímeros.

Tomado de: Goodfellow. Información sobre materiales 2021 Disponible en:

<http://www.goodfellow.com/S/Politereftalato-de-Etileno.html>

Ya con los datos exactos, se realizan los cálculos para conocer la energía necesaria para llegar a la temperatura de formado de cada polímero con la **Ecuación 2** de la energía requerida por unidad de tiempo; obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 18.

Calor requerido.

Materiales	Calor requerido Q_L (Kw)
Poliestireno (PS)	1,67
Cloruro de polivinilo (PVC)	2,33
Poliéster (PET)	1,825

Nota. Resultados del calor requerido por cada polímero para ser formado.

Para efectos de selección del conjunto de resistencias se considera un factor de seguridad del **25%** más de energía que requiere el sistema debido a que su eficiencia no es de un 100 % y experimenta pérdidas de calor durante su proceso; al aplicar este porcentaje la energía requerida en Watts sería de **2912,5W** para el polímero que mayor energía requiere y es el PVC.

En el caso del Poliestireno y el poliéster estos requieren menos potencia para llegar a su temperatura de formado, es por eso que el sistema de resistencias cuenta con un potenciómetro y una termocupla para aplicar únicamente el calor requerido en el lapso de tiempo definido de $\Delta_t = 60s$; aplicando exclusivamente **2087,5W** y **2281,25W** respectivamente a cada lámina de polímero.

El área dispuesta aprovechable es de **40 cm x 40 cm** para un total de **1600 cm²** y se define con anterioridad, ya que es preciso precalentar sólo la zona que será deformada, para evitar deformaciones y atascos en la máquina por des colgamientos u otras complicaciones asociadas.

Por medio de la empresa Colombiana Electro Silvania ubicada en la ciudad de Bogotá, fabricantes de resistencias eléctricas se realizó la cotización correspondiente, con la información que obtuvimos y cumpliendo los requerimientos necesarios para abastecer el sistema de calentamiento; suministran un conjunto de resistencias conformado por 4 elementos calefactores en cuarzo, una estructura en aluminio-acero inoxidable con un aislamiento térmico, que se da a través de una manta térmica en las paredes que lo rodean impidiendo que la radiación emitida se pierda en los alrededores y con una temperatura de operación de 300°C que con la configuración del diseño permite reflejar el calor, transfiriéndolo directamente sobre la lámina de manera uniforme, incluyendo elementos de control de temperatura por medio de un termostato análogo Rainbow Ref 71321 como sistema de control de temperatura; con un rango de 50 a 320°C, una precisión de $\pm 10^\circ\text{C}$, con salida de 30A/250VAC y un tamaño de bulbo de $\varnothing 6\text{mm}$ y longitud 156mm ubicado dentro de la configuración estructural de las resistencias eléctricas tubulares.

4.2 Sistema de vacío

Para el sistema de vacío se debe tener en cuenta principalmente el adelgazamiento que va a experimentar la hoja de polímero semi elaborada según Multifab Incorporated [12] el volumen máximo del material a deformar recomienda una relación de áreas igual a 3

lo que significa que la relación de estirado alcanzada no puede superar el valor antes mencionado el cual se puede obtener través de:

Ecuación 5.

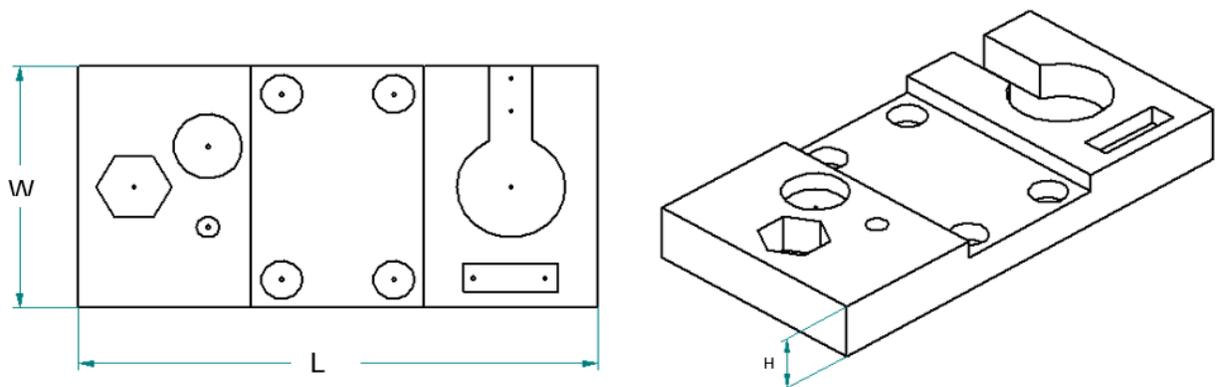
Relación de estirado.

$$R_{estirado} = \frac{2(LH) + 2(WH) + (WH)}{(LW)}$$

Donde L es la longitud de la base del objeto deformado, W es el ancho de la base del objeto deformado y H la altura del objeto deformado como se muestra a continuación.

Figura 7.

Molde para termoformado.



Nota. Ilustración de geometría con simbología de cotas. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

Para conocer la presión negativa de vacío o presión necesaria para evacuar el aire dentro del sistema, se debe tener en cuenta el volumen del objeto o molde, que se da asumiendo las dimensiones máximas que puede tomar el objeto deformado de **40 cm x 40 cm x 20 cm** de profundidad, habiendo otro tipo de combinaciones dimensionales se establecen estas para efectos de cálculo; la relación máxima obtenida para el estirado con dichas dimensiones es de $R_{estirado} = 3$, lo que nos permite hallar el volumen del objeto moldeado a través de:

Ecuación 6.

Volumen del objeto.

$$V_{objeto} = L \times H \times W$$

Remplazando:

$$V_{objeto} = 40 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} = 3200 \text{ cm}^3 \approx 0,0032\text{m}^3$$

Los cálculos anteriores ignoran el efecto de una característica específica de la pieza (es decir, un dibujo o detalle localizado en la geometría).

En el caso de que el operario quiera obtener un calibre específico se puede lograr con la siguiente ecuación

Ecuación 7.

Calibre mínimo de inicio.

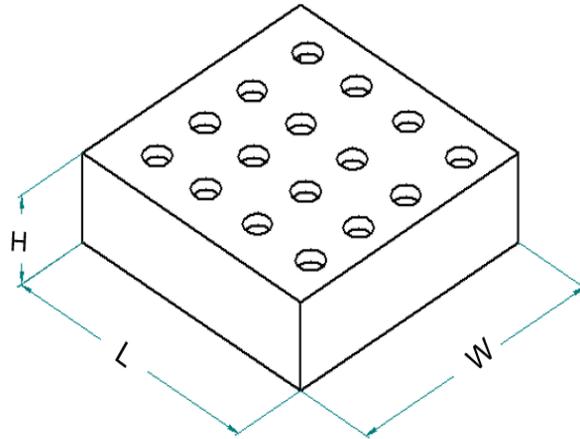
$$\text{Calibre mínimo de inicio} = R_{estirado} \times \text{Calibre final deseado}$$

Para el calibre mínimo de inicio de 3mm que trabajarán las láminas de polímeros semi elaboradas que se formarán en la máquina multifuncional el calibre final deseado que se obtiene con una $R_{estirado} = 3$ es de 1mm.

A su vez este sistema debe incluir una mesa o caja de vacío tal como se muestra en la figura.

Figura 8.

Mesa de vacío.



Nota. Ilustración de geometría de la mesa o caja de vacío. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

Para el diseño de dicha caja de vacío se tuvo en cuenta el tamaño del cual van hacer elaborados los orificios o barrenos, que según el manual técnico de termoformado Plastiglas un rango apropiado varía entre 1/32" hasta 1/8" [1] ya que se considera que el espesor final de la pieza es muy delgado y el espacio entre orificios comercialmente están fabricados en los rangos de 6 mm a 10 mm; para el tamaño de esta máquina se definen las dimensiones de los orificios con un $\varnothing=1/8"$ (3,175 mm) con una distancia entre orificios de 10 mm.

Contando con la información necesaria, el tamaño determinado para la mesa de vacío es de $L=42$ cm, $W=42$ cm, $H=3$ cm haciendo uso de la ecuación obtenemos:

Ecuación 8.

Volumen de la mesa de vacío.

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

Remplazando

$$V_{\text{mesa}} = 42 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 42 \text{ cm} = 5292 \text{ cm}^3 \approx 0.005292 \text{ m}^3$$

En el sistema de vacío también involucra mangueras neumáticas con una longitud aproximada de 1 m para las conexiones de la bomba, el tanque acumulador de vacío y accesorios de instrumentación; de esta manera se debe incluir el volumen de aire que contiene este conjunto de elementos y se da a través de la ecuación.

Ecuación 9.

Volumen de aire almacenado en la manguera.

$$V_{manguera} = \pi \times \frac{d^2}{4} \times L_{manguera}$$

Donde d es el diámetro interior de la manguera implementada y $L_{manguera}$ es la longitud.

Figura 9.

Catálogo de mangueras neumáticas.

TIPO	REFERENCIA	DIAMETRO INTERNO	TIPO	MATERIAL	PRESION MAXIMA DE TRABAJO PSI	LONGITUD mm	RACOR	OBSERVACIONES
A	RP0406	1/4"			125	153	1/4"	Prolonga la vida útil de la manguera al eliminar el estrés, e incrementa la productividad al facilitar la manipulación de la herramienta. Instale el suplemento entre el acople y la herramienta para que éste absorba la vibración.
A	RP0812	1/2"	Suplemento	Polyuretano	125	300	1/2"	
A	RP0612	3/8"			125	300	3/8"	
B	N14-12C	1/4"	Espiral	Nylon	185	370	1/4"	Fabricada de Nylon de alta resistencia a la abrasión, suministrada con racores de bronce y resorte anti flexión.
B	N38-25C	3/8"			165	780	3/8"	
C	H14800N	1/4"	Manguera	Polyuretano	200	X 100*	N.A	Manguera de uso general, diseñada para aire o agua. Factor de seguridad 4:1
C	H38700N	3/8"			200	X 100*	N.A	
C	H12550N	1/2"			200	X 100*	N.A	

Nota. Catálogo de mangueras neumáticas. Tomado de: Manguera neumática. CIE de Colombia S.A.S Disponible en <https://n9.cl/dzp3u>

Ya con la selección de la manguera adecuada para el proceso y con la información dimensional, reemplazando la **Ecuación 9** se obtiene:

$$V_{manguera} = \pi \times \frac{(0.635 \text{ cm})^2}{4} \times 100 \text{ cm} = 31.66 \text{ cm}^3 \approx 0.0000316 \text{ m}^3$$

Lo que se busca al obtener todos los resultados es conocer el volumen de aire contenido dentro del sistema y que se requiere evacuar; este volumen se permite calcular con la suma de todos los volúmenes que se consiguieron con anterioridad de la siguiente manera:

Ecuación 10.

Volumen total de aire a evacuar.

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

Donde reemplazando se obtiene:

$$V_{total} = 3200 \text{ cm}^3 + 5292 \text{ cm}^3 + 31.66 \text{ cm}^3 = 8523.66 \text{ cm}^3 \approx 0.08523 \text{ m}^3$$

Ya para la selección de la bomba apropiada para generar el vacío necesario se realizó el cálculo de la capacidad de bombeo que implica los siguientes aspectos en la ecuación tomada de capacidad de bombeo propuesta por Marks en 1984 en el libro manual del ingeniero mecánico [5].

Ecuación 11.

Capacidad de bombeo que requiere la bomba de vacío.

$$S_p = \frac{V_{total}}{t} \times \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Donde S_p = Capacidad de bombeo, V_{total} = Volumen total en el sistema, t = Tiempo estimado de aplicación de vacío equivalente a 5 segundos, P_1 = Presión atmosférica en Bogotá 560 mm Hg y P_2 = Presión de vacío absoluta en el proceso de termoformado 685.8 mm Hg.

$$S_p = \frac{0.08523 \text{ m}^3}{5 \text{ s}} \times \ln\left(\frac{560 \text{ mm Hg}}{685.8 \text{ mm Hg}}\right) = 0.003454 \text{ m}^3/\text{s} \approx 7.31 \text{ cfm}$$

Seleccionamos la bomba de vacío Robinair Ref 15800 con capacidad para desplazar 8 CFM garantizando los 7.31 Cfm que requiere el sistema, clasificación de 40 micrones, de 2 tiempos, conexiones de 1/4" MFL y 3/8" MFL, con dimensiones de 406 x 152 x 254 mm, motor de 1 hp y voltaje de 115V a una frecuencia de 60Hz que se puede proveer a través de la empresa Vía Industriales en las principales ciudades de Colombia.

Figura 10.

Catálogo de bombas de vacío.

Model	Free Air Displacement	Factory Micron Rating	No. of Stages	Intake Fitting	Oil Capacity	Motor Size	Voltage	Weight	Dimensions
Domestic Models									
15150	1.5 CFM	50 microns	2	1/4" MFL and 3/8" Acme 3/8" FFL x 1/2" Acme adapter	7.4 oz. (219 ml)	1/4 hp	115V 60Hz	22 lbs. (10 kg)	9.5" H x 4.75" W x 12.5" L 240 mm x 120 mm x 315 mm
15300	3 CFM	40 microns	2	1/4" MFL and 3/8" MFL 3/8" FFL x 1/2" Acme adapter	7.5 oz. (220 ml)	1/3 hp	115V 60Hz	28 lbs. (12.5 kg)	10" H x 5" W x 13" L 255 mm x 123 mm x 336 mm
15500	5 CFM	40 microns	2	1/4" MFL and 3/8" Acme 3/8" FFL x 1/2" Acme adapter	7.5 oz. (220 ml)	1/3 hp	115V 60Hz	28 lbs. (12.2 kg)	10" H x 5" W x 13" L 255 mm x 123 mm x 336 mm
15800	8 CFM	40 microns	2	1/4" MFL and 3/8" MFL	18.6 oz. (550 ml)	1 hp	115V 60Hz	37 lbs. (16.8 kg)	16" H x 6" W x 10" L 406" mm x 152mm x 254mm
International Models									
15301	71 liters/minute 3 CFM	40 microns	2	1/4" MFL and 1/2" MFL 3/8" FFL x 1/2" Acme adapter	7.5 oz. (220 ml)	1/3 hp	220V 50Hz	28 lbs. (12.5 kg)	10" H x 5" W x 13" L 255 mm x 123 mm x 336 mm
15501	118 liters/minute 5 CFM	40 microns	2	1/4" MFL and 1/2" Acme 3/8" FFL x 1/2" Acme adapter	7.5 oz. (220 ml)	1/3 hp	220V 50Hz	28 lbs. (12.5 kg)	10" H x 5" W x 13" L 255 mm x 123 mm x 336 mm

Nota. Tabla descriptiva de las características de algunas bombas de vacío. VacuMaster Robinar Disponible en <https://n9.cl/j7lau>

4.2.1 Selección del tanque acumulador de vacío

El tanque acumulador de vacío es el encargado de realizar la evacuación del aire para el correcto formado de las geometrías, el volumen que recomienda el manual técnico de termoformado Plastiglas de México [1] es de:

Ecuación 12.

Capacidad de almacenamiento del tanque.

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

Remplazando:

$$V_{tanque} = 2.5 \times 8523.66 \text{ cm}^3 = 21309,15 \text{ cm}^3 \approx 21,309 \text{ L} \approx 5.61 \text{ galones}$$

Conociendo la capacidad que demanda el almacenamiento de vacío, se procedió a seleccionar un tanque acumulador de vacío que suple las necesidades que demanda el sistema; el tanque adecuado para el sistema que se escogió es el Tanque horizontal portátil Torin de referencia T88007 que cuenta con las siguientes características.

Tabla 19.

Ficha técnica de tanque de almacenamiento.

Fabricante	Torin
Marca	BIG RED
Modelo	T88007
Peso del producto	2 kg
Dimensiones del producto	46 x 37 x 36 centímetros
Capacidad de almacenamiento	7 galones
Presión máxima de trabajo	125 psi
Características adicionales	Incluye manómetro fácil y válvula de liberación de presión.

Nota. Descripción de la ficha técnica del tanque acumulador T88007.

4.3 Sistema de soplado

El sistema de presión positiva de la máquina de termoformado, será suministrado a través de las líneas de aire comprimido con las cuentan los laboratorios de ingeniería mecánica en la Fundación Universidad de América, donde su valor de presión oscila entre los 60 psi cuando el sistema se encuentra en su mínimo pico de presión y 90 psi cuando está a su máxima potencia ; que son adecuados para aplicar al sistema de soplado que requiere la máquina, ya que los rangos para aplicar el formado se encuentran entre **3 atm y 4 atm** lo que equivale a 44.0878 psi y 58,7838 psi respectivamente y garantiza que aunque se encuentre en su pico mínimo de presión puede abastecer sin ningún problema los requerimientos para el formado.

Se establecen las dimensiones máximas que puede ocupar la geometría o molde para este tipo de formado y son las siguientes **40cm x 40cm x 20cm** teniendo la posibilidad de realizar diferentes configuraciones dimensionales que no superen el volumen de 3200 cm^3 que ocupan estas dimensiones.

El sistema de presión positiva requiere boquillas apropiadas para obtener de manera correcta las geometrías, es por eso que el sistema cuenta con un acople macho roscado de ¼” que permite intercambiar las boquillas que se recomiendan a continuación:

Boquilla exair con compresión de aire 25 veces más efectiva; libera aire comprimido a través de un pequeño orificio en el otro lado del anillo exterior. Este agujero permite el escape rápido pero seguro de aire a grandes volúmenes y velocidades gracias al chorro que está diseñado en cono lleno, un diámetro de 0,25” con rosca de ¼” para acoplar permitiendo una amplificación de caudal y se puede conseguir en acero inoxidable y latón.

Figura 11.

Boquillas exair.



Nota. Boquilla exair en acero inoxidable y latón tomado de: Boquilla de soplado. Direct Industry Disponible en: <https://n9.cl/2e0p1>

Boquilla de soplado UEA D020 que produce un potente chorro de aire concentrado en un punto de impacto bien definido. Esta boquilla está especialmente diseñada para las geometrías de agujeros profundos y ciegos, producen menos ruido y reducen la pérdida de presión; están fabricadas en acero inoxidable o aluminio con acople hembra de ¼”.

Figura 12.

Boquilla de soplado UEA D020.



Nota. Boquilla de chorro para geometrías de grandes profundidades. Tomado de: Boquilla de soplado UEA D020. Direct Industry. Disponible en: <https://n9.cl/xs7dq>

4.4 Sistema de desplazamiento

La alternativa más óptima seleccionada con anterioridad radica en implementar un sistema neumático que trabaje con un fluido gaseoso, el cual se decidió utilizar aire comprimido que permite dicho desplazamiento; siendo esta alternativa la más adecuada no se descartó la posibilidad de incluir un sistema mecánico, ya que el conjunto de los sistemas que conforman la máquina requieren de más de un desplazamiento; en el caso del sistema que requiere menor precisión en su movimiento y es el sistema de calentamiento, se seleccionan guías de movimiento lineal SSR 15-20 de la marca THK.

Para aquellos que requieren de una mayor exactitud se seleccionaron cilindros neumáticos doble efecto con guías lineales de la misma referencia para realizar el movimiento con mayor exactitud.

En la selección de los cilindros se define con anterioridad algunos datos que son útiles para efectos de cálculo en la correcta selección de los cilindros y se precisan parámetros para dar un peso aproximado de algunos elementos como los moldes que estarán fabricados en aluminio, los cuales presentan mayor durabilidad; conociendo la densidad y el volumen máximo que puede ocupar cada molde nos permite hallar el peso con la

Ecuación 4.

Masa de molde en aluminio.

$$m = 2,700 \frac{kg}{m^3} \times 0,0032m^3 = 8,64 kg$$

Tabla 20.

Elementos a desplazar.

Sistema	Peso (kg)	Peso (N)
Mesa de vacío	7	68,65
Molde para formado en vacío	8,64	84,73
Plataforma de soplado	18	176,5
Molde macho y/o de compresión	8,64	84,73

Nota. Peso promedio de elementos que requieren desplazamiento.

Ya para la selección de los cilindros neumáticos que permiten el desplazamiento en el sistema de la mesa de vacío y el sistema de soplado, lo primero que se procede hacer para su selección, es hallar la fuerza que debe elevar cada cilindro aplicando un factor de seguridad para cilindro rápido con carga en toda la carrera equivalente al 50% de la carga, el cual garantiza que el diámetro con el que debe contar cada cilindro transporte la carga sin ningún problema; la fuerza que requiere el cada cilindro es de:

Ecuación 13.

Fuerza que requieren desplazar los cilindros con factor de seguridad.

$$F_1 = 153,38N + (153,38N \times 50\%) = 230,07N$$

$$F_2 = 261,23N + (261,23N \times 50\%) = 391,845N$$

Contado con los valores en fuerza que debe transportar cada cilindro y la presión de alimentación que es suministrada por líneas de aire comprimido de la Universidad que en su límite inferior trabaja a 60 psi \approx 413685 Pa entonces se procedió hallar el área requerida para cada cilindro despejándola de la siguiente ecuación:

Ecuación 14.

Fuerza que ejerce los cilindros.

$$F = A \times P$$

Donde F es la fuerza requerida por el embolo, A es el área requerida para el cilindro y P es la presión de alimentación.

Ecuación 15.

Despeje de área que requiere mover el embolo de cada cilindro.

$$A = \frac{F}{P}$$

Donde se toma como valor de fuerza; la fuerza con el factor de seguridad equivalente al 50% de la fuerza.

$$A_{cilindro1} = \frac{230,07N}{413685 \text{ N/m}^2} = 0,00055614m^2$$

$$A_{cilindro2} = \frac{391,845N}{413685 \text{ N/m}^2} = 0,00094720m^2$$

Se tuvo en cuenta que la ecuación de área es definida para una superficie circular por lo cual se establece a través de la ecuación el despeje del diámetro.

Ecuación 16.

Área de un círculo.

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

Despejando se obtiene:

Ecuación 17.

Diámetro del embolo.

$$D = \sqrt{\frac{A \times 4}{\pi}}$$

$$D_{embolo1} = \sqrt{\frac{0,00055614 \times 4}{\pi}} = 0,02661m \approx 2,661 \text{ cm}$$

$$D_{embolo2} = \sqrt{\frac{0,00094720m^2 \times 4}{\pi}} = 0,03472m \approx 3,472cm$$

Conociendo el diámetro que requiere cada embolo y apoyándose del sistema Cad Solid Edge modelando la alternativa de diseño que se plantea, se puede evidenciar que la carrera aproximada que debe tener cada cilindro es de 25 cm para cada uno, lo que permite completar la información necesaria para seleccionar los cilindros neumáticos.

Para el primer cilindro que tiene como principal función desplazar el sistema de vacío y que cuenta con un diámetro de embolo equivalente a 2,66 cm se aproximó al valor más cercano que cumple con los requerimientos siendo este valor 3,2 cm; se escoge en el catálogo de cilindros neumáticos de Festo el cilindro compacto de referencia ADN-32 de doble efecto con carrera de 1 a 400mm y un peso aproximado de 5,33 kg.

El segundo cilindro con diámetro de embolo equivalente a 3,472 cm que tiene como función desplazar el sistema de soplado y mecánico (molde macho) dentro del catálogo Festo la mejor alternativa es el cilindro compacto de doble efecto de diámetro 4 cm con referencia ADN-40 con carrera de 1 a 400mm y un peso aproximado de 5,8 kg.

Es importante mencionar que cada cilindro cuenta con la posibilidad de definir la carrera, la cual limita la presión aplicada sobre la superficie desplazada donde su principal objetivo es impedir la sobrepresión en el sistema, que pueda incurrir en accidentes o daños en otros sistemas.

4.5 Estructura

Para el diseño del sistema estructural rígido que compone la alternativa seleccionada se contempló en primera instancia el área disponible y zonas donde se debe desplazar la máquina de termoformado dentro de la Fundación Universidad de América; seguido se tuvo en cuenta los pesos de los sistemas que son significativos y que finalmente se traducen en fuerzas aplicadas en las columnas y vigas que hacen parte de la estructura.

Dichas cargas fueron consideradas y evaluadas con mayor importancia en las zonas de mayor criticidad de la máquina de termoformado multifuncional; la información de los pesos es suministradas por los fabricantes de cada uno de los sistemas seleccionados incluyendo los pesos que se hallaron en el sistema neumático y aquellos que se diseñaron se tomó un peso aproximado arrojado por el Cad modelado en Solid Edge.

Tabla 21.

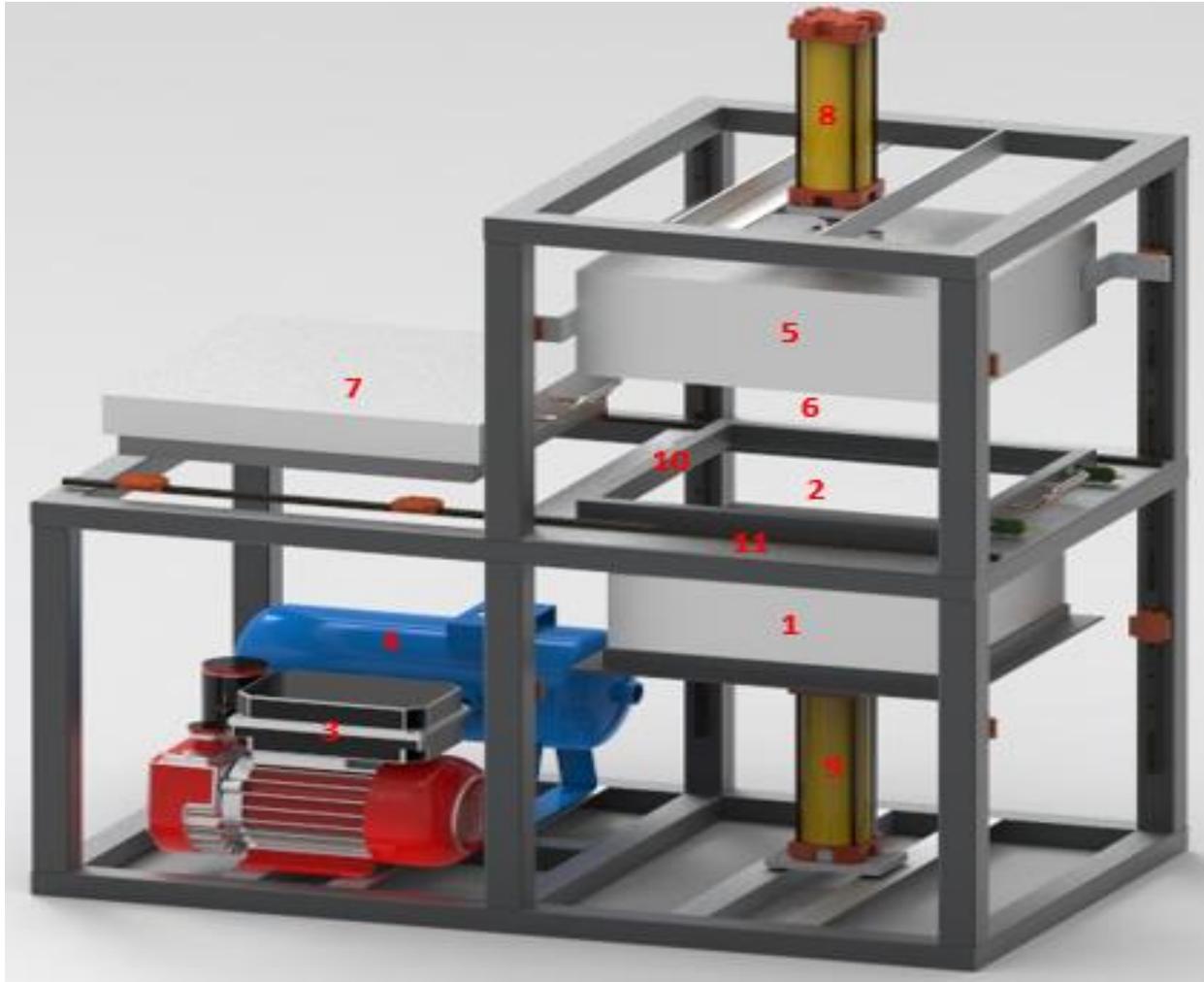
Elementos que conforman la máquina de termoformado.

Ítem	Sistema	Peso (kg)	Peso (N)
1	Mesa de vacío	7	68,65
2	Molde para formado en vacío	8,64	84,73
3	Bomba de vacío	16,8	164,8
4	Tanque de almacenamiento	2	19,62
5	Plataforma de compresión	18	176,5
6	Molde macho y/o de compresión	8,64	84,73
7	Calentamiento	15	147,1
8	Cilindro neumático 1	5,33	52,37
9	Cilindro neumático 2	5,8	56,89
10	Plataforma de sujeción	5	49,05
11	Placa fija	11	107,8

Nota. Peso de elementos que generan carga sobre la estructura de la termoformadora.

Figura 13.

Ilustración de la termoformadora multifuncional con nomenclatura de cada elemento que conforman los sistemas.



Nota. Máquina de termoformado multifuncional con numeración de los elementos que la conforman; el N°2 y N°6 representan la ubicación de los moldes que no se incluyen en el diseño. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

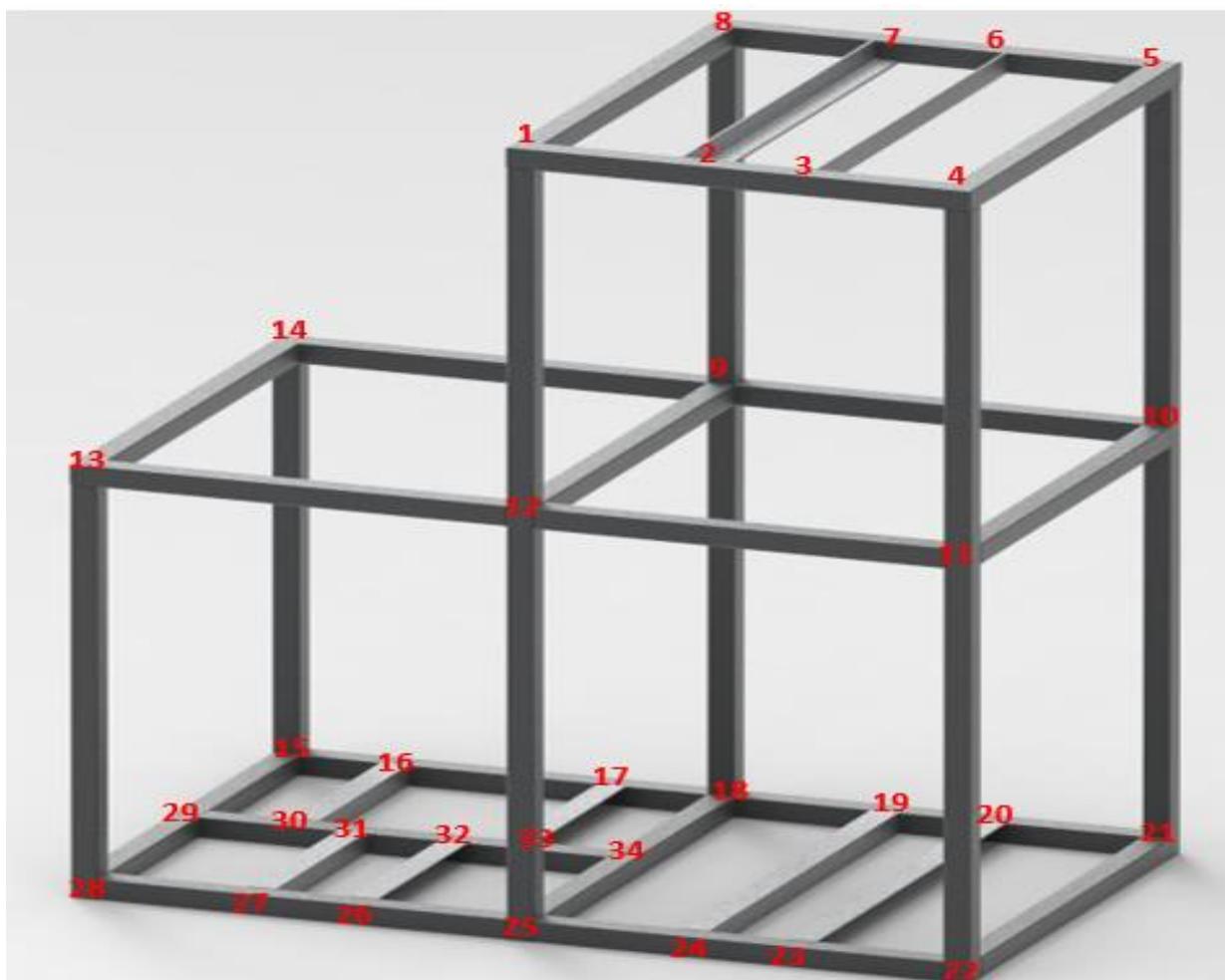
4.5.1 Cálculo de cargas sobre las vigas

Las vigas fueron evaluadas en cada uno de los niveles donde actúan diferentes cargas, comenzando por determinar las reacciones que se generan en el nivel 1, donde para efectos de diferenciación se le asignó una nomenclatura a cada apoyo para facilitar el

cálculo de las reacciones y con anterioridad se obtuvo información de las cargas que se aplican en cada nivel.

Figura 14.

Nomenclatura en cada apoyo de la estructura.

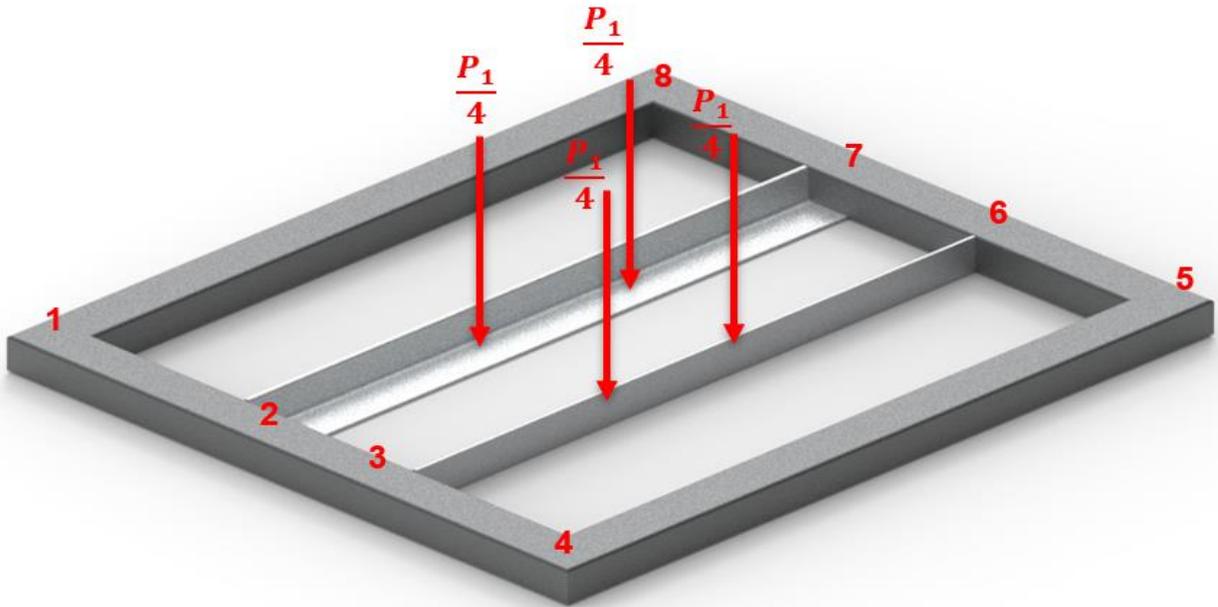


Nota. Estructura de termoformadora con nomenclatura en cada apoyo. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

4.5.1.a Cálculo nivel 1.

Figura 15.

Nivel superior con nomenclatura en los puntos de apoyo.



Nota. Se presenta el nivel 1 con nomenclatura asignada a cada apoyo, la cual permite diferenciar y nombrar el tipo de viga que se desea evaluar. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

Se comenzó por definir la carga aplicada sobre los ángulos que soportan el cilindro 1, la plataforma de compresión y el molde macho.

Ecuación 18.

Sumatoria de cargas que actúan sobre el nivel 1.

$$P_1 = P_{cilindro1} + P_{Plataforma\ de\ compresión} + P_{molde\ macho}$$

$$P_1 = 52,37N + 176,5N + 84,73N = 313,6N$$

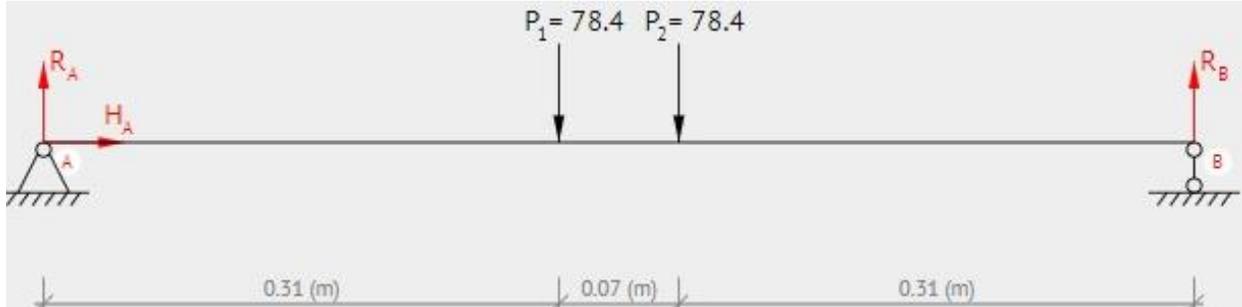
Nota. Se suman los valores en Newton de las fuerzas que se aplican sobre la superficie del nivel 1.

A cada sección de la viga que es evaluada se le realizó el correspondiente diagrama de cuerpo libre donde se evidencia la ubicación en que actúan las fuerzas sobre la viga; además del diagrama de fuerza cortante y momento flector.

4.5.1.a.a Cálculo en la viga 2-7.

Figura 16.

Diagrama de cuerpo libre con cargas aplicadas y reacciones en la viga 2-7.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Ecuación 19.

Ecuación de equilibrio de fuerzas aplicadas en la viga 2-7.

$$\begin{aligned}\Sigma F_Y &= 0 \\ 0 &= R_2 - \frac{P_1}{4} - \frac{P_1}{4} + R_7 \\ 0 &= R_2 - 78,4N - 78,4N + R_7\end{aligned}$$

Nota. Sumatoria de fuerzas que actúan en el eje Y sobre la viga 2-7

Para determinar las reacciones en los apoyos 2 y 7 se acudió a la sumatoria de momentos con respecto a la posición del apoyo 2, la cual se puede determinar a través de la siguiente ecuación.

Ecuación 20.

Ecuación de momento con respecto al apoyo 2.

$$\Sigma M_2 = 0$$

$$0 = -(78,4N \times 0,3135m) - (78,4N \times 0,3865m) + (R_7 \times 0,7m)$$

$$0 = -(24,578Nm) - (30,301Nm) + (R_7 \times 0,7m)$$

$$R_7 = \frac{24,578Nm + 30,301Nm}{0,7m}$$

$$R_7 = 78,4N$$

Nota. Se realiza la sumatoria de momentos con respecto a las distancias de las fuerzas aplicadas, la cual permite hallar la reacción en el apoyo 7 y así mismo la reacción R_2 por medio del despeje de la ecuación.

Despeje de la **Ecuación 19** de equilibrio se obtiene la resultante en el apoyo 2.

$$0 = R_2 - 78,4N - 78,4N + R_7$$

$$R_2 = 78,4N + 78,4N - R_7$$

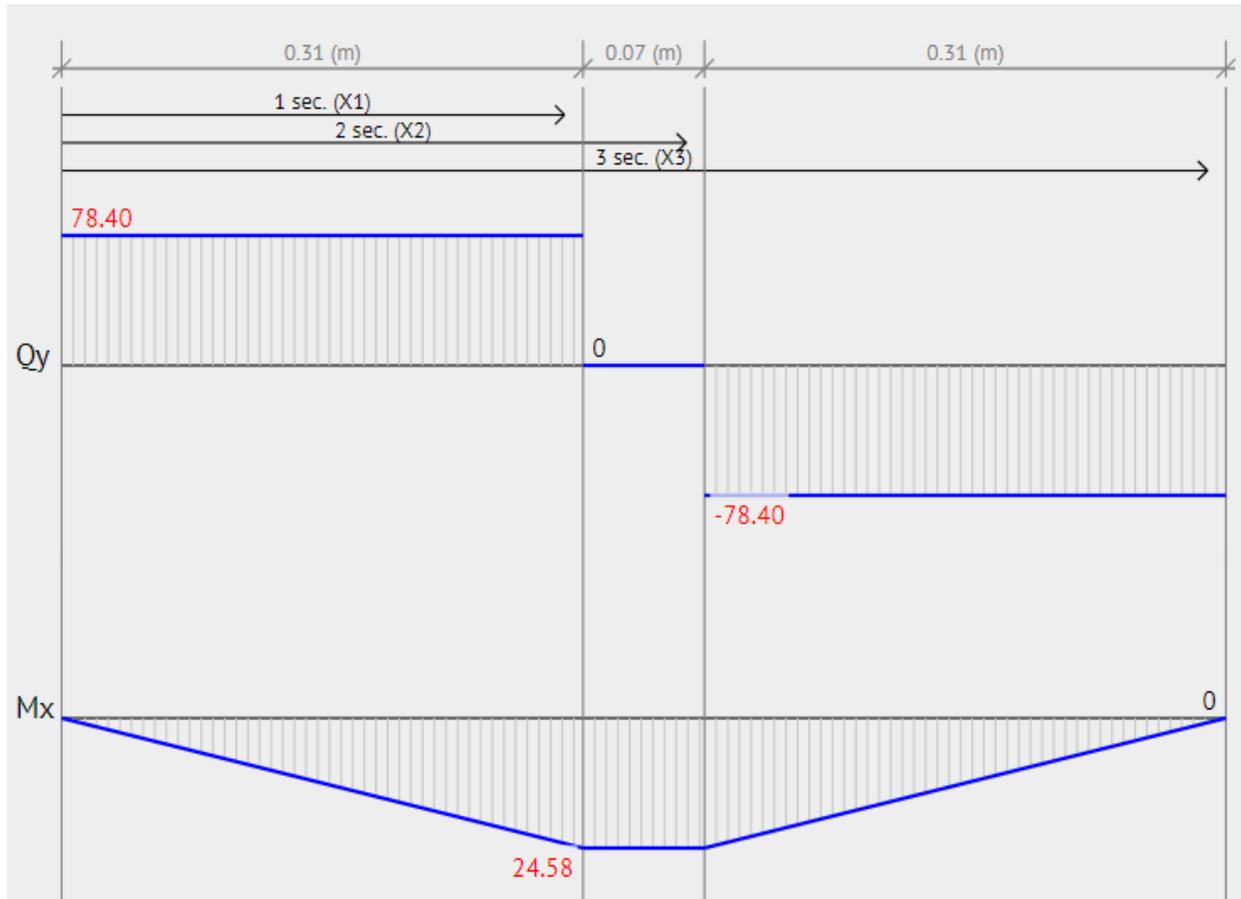
$$R_2 = 156,8N - 78,4N$$

$$R_2 = 78,4N$$

Nota. La reacción que se obtiene corresponde a la reacción que generan las cargas en el apoyo 2

Figura 17.

Diagrama de fuerza cortante y momento flector para la viga 2-7.



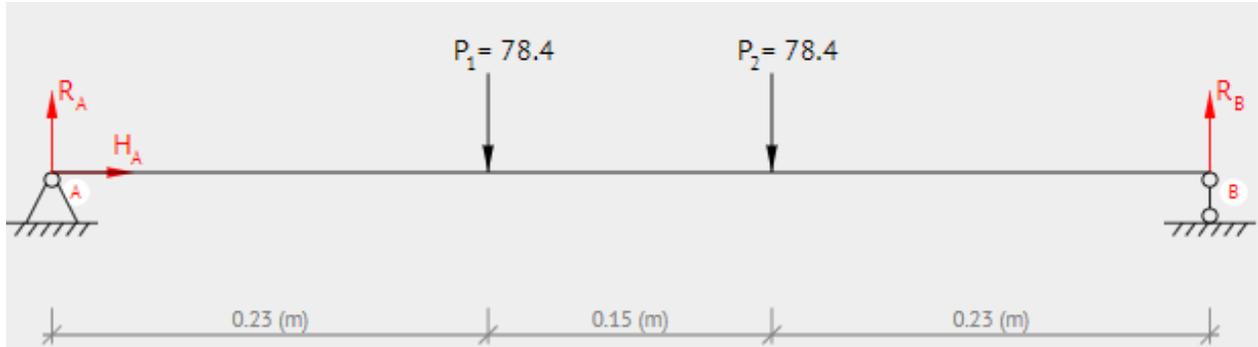
Nota. Los diagramas se obtienen a partir del software en línea Beamguru. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Se comparan y verifican los valores de las reacciones que se obtiene a partir de las cargas puntuales que se generan en las uniones del perfil producidas por el sistema de soplado, el molde y el cilindro 1; por la condición de simetría la **viga 3-6** cuenta con las mismas reacciones, pero en diferente posición, que afectan las vigas 1-4 y 5-8 en igual magnitud por tal razón se decide evaluar solo la viga 1-4.

4.5.1.a.b Cálculo viga 1-4.

Figura 18.

Diagrama de cuerpo libre con cargas aplicadas y reacciones en la viga 1-4.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Ecuación 21.

Ecuación de equilibrio de fuerzas aplicadas en la viga 1-4.

$$\begin{aligned}\Sigma F_Y &= 0 \\ 0 &= R_1 - R_2 - R_7 + R_4 \\ 0 &= R_1 - 78,4N - 78,4N + R_4\end{aligned}$$

Nota. Sumatoria de fuerzas que actúan en el eje Y sobre la viga 1-4.

Para determinar las reacciones en los apoyos 1 y 4 se acudió a la sumatoria de momentos con respecto a la posición del apoyo 1, la cual se puede determinar a través de la siguiente ecuación.

Ecuación 22.

Ecuación de momento con respecto al apoyo 1.

$$\begin{aligned}\Sigma M_1 &= 0 \\ 0 &= -(78,4N \times 0,226m) - (78,4N \times 0,373m) + (R_4 \times 0,6m) \\ 0 &= -(17,71Nm) - (29,24Nm) + (R_4 \times 0,6m)\end{aligned}$$

$$R_4 = \frac{17,71Nm + 29,24Nm}{0,6m}$$
$$R_4 = 78,4N$$

Nota. Se realiza la sumatoria de momentos con respecto a las distancias de las fuerzas aplicadas, la cual permite hallar la reacción en el apoyo 4 y así mismo la reacción R_4 por medio del despeje de la ecuación.

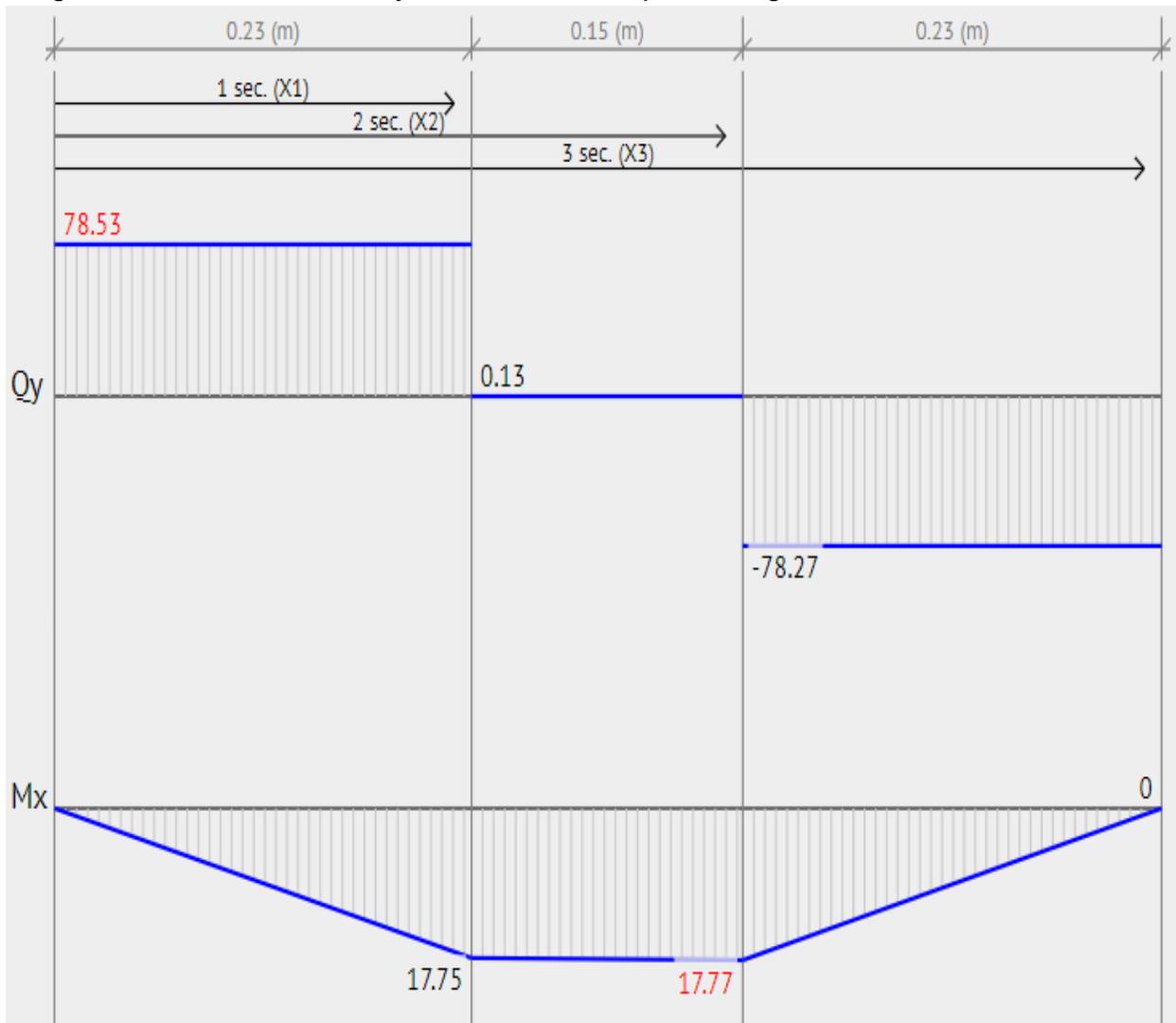
Despejando de la **Ecuación 21** de equilibrio.

$$0 = R_1 - 78,4N - 78,4N + R_4$$
$$R_1 = 78,4N + 78,4N - R_4$$
$$R_1 = 156,8N - 78,4N =$$
$$R_1 = 78,4N$$

Nota. La reacción que se obtiene corresponde a la reacción que generan las cargas en el apoyo 1.

Figura 19.

Diagrama de fuerza cortante y momento flector para la viga 1-4.



Nota. Los diagramas se obtienen a partir del software en línea Beamguru. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

4.5.1.a.c Tabla de resultados nivel 1. Las reacciones que se obtuvieron en este nivel de la estructura son simétricas, por lo cual permite deducir que las reacciones en todos los apoyos son de la misma magnitud y en las vigas 1-8 y 4-5 no se genera momento.

Tabla 22.

Cargas y momentos aplicados en el primer nivel.

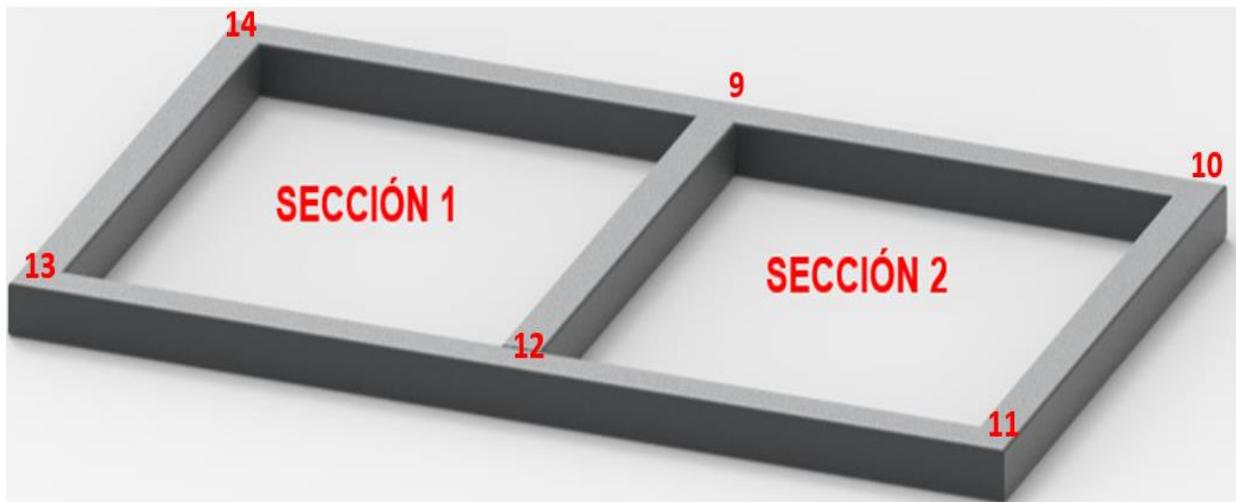
Viga	Fuerza resultante	M_{max}
1-4	$R_1 = 78,4 N$ y $R_4 = 78,4N$	17,77 Nm
1-8	$R_1 = 78,4 N$ y $R_8 = 78,4N$	0
2-7	$R_2 = 78,4 N$ y $R_7 = 78,4N$	24,58 Nm
3-6	$R_3 = 78,4 N$ y $R_6 = 78,4N$	24,58 Nm
4-5	$R_4 = 78,4 N$ y $R_5 = 78,4N$	0
5-8	$R_5 = 78,4 N$ y $R_6 = 78,4N$	17,77 Nm

Nota. Resultado de fuerzas resultantes aplicadas y momentos máximos en las vigas.

4.5.1.b Cálculo nivel 2. En este caso se divide el nivel intermedio en dos secciones como se muestra en la figura 24 y se evalúa la condición más crítica que se presenta en la sección 2 donde se encuentra la carga distribuida del conjunto de sistemas que actúa durante el proceso de reblandecimiento de la lámina.

Figura 20.

Nivel intermedio con nomenclatura en los apoyos y secciones.



Nota. Se dividen las secciones del nivel 2 con nomenclatura para identificar la sección más crítica en el desarrollo de los cálculos. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

Estimando las dimensiones necesarias de la carga que se distribuye por la sección 2, se define el área en la cual actúan de la siguiente manera.

Ecuación 23.

Área total de la carga.

$$A_{total} = L * W$$

Nota. L hace referencia a la longitud total de la sección 2 y W al ancho total de la misma.

Remplazando la **Ecuación 23** con los valores correspondientes se obtiene:

$$A_{total} = 0,6m \times 0,7m$$

$$A_{total} = 0,42m^2$$

Nota. Área total donde actúa la carga distribuida en el nivel 2.

De manera consecutiva se efectúa el cálculo de la fuerza que es aplicada en el nivel intermedio por unidad de área, iniciando por definir la carga sobre la sección 2; la cual soporta una placa fija, el sistema de calentamiento y la plataforma o marco de sujeción.

Ecuación 24.

Sumatoria de cargas que actúan sobre la sección 2.

$$P_{Sección2} = P_{Placa\ fija} + P_{plataforma\ de\ sujeción} + P_{sistema\ de\ calentamiento}$$

$$P_{Sección2} = 49N + 107,8N + 147N = 303,8N$$

Nota. Se suman los valores en Newton de las cargas distribuidas que se aplican sobre la sección 2.

Se requiere obtener la carga total distribuida sobre el área de sección crítica del nivel 2 y se consigue a través de la siguiente ecuación.

Ecuación 25.

Carga total distribuida en la sección 2.

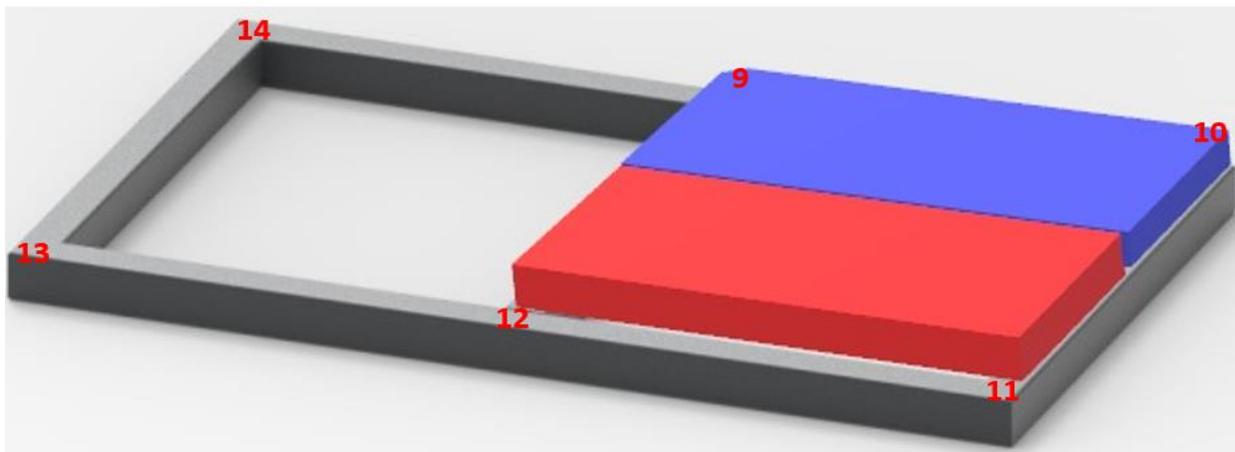
$$Q_{total} = \frac{P_{Sección2}}{A_{total}}$$
$$Q_{total} = \frac{303,8 N}{0,42m^2}$$
$$Q_{total} = 723,3 N/m^2$$

Nota. Valor total de la fuerza por unidad de área que actúa sobre la sección 2.

Disponiendo del valor de la carga total que actúa sobre la sección 2 por unidad de área se procedió a obtener el área tributaria para cada viga, la cual es simétrica en las vigas 9-10 y 11-12 lo que indica que cuentan con el mismo valor de área y fuerza como lo muestra en la figura 25; así que por su simetría solo se requiere realizar el cálculo de una de las dos vigas.

Figura 21.

Ilustración de nivel intermedio con áreas tributarias definidas.



Nota. Nivel 2 con áreas tributarias definidas en la sección 2. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

Se realiza el cálculo para definir las áreas tributarias que le corresponden a cada viga.

Ecuación 26.

Área tributaria de la viga.

$$A_{viga} = W \times \frac{L}{2}$$

$$A_{viga} = 0,7m * \frac{0,6m}{2}$$

$$A_{viga} = 0,21m^2$$

Nota. Área tributaria correspondiente a cada viga.

Para establecer la carga que está en el área tributaria de la viga se realizó el cálculo a través de la regla de tres con valores que se obtuvieron con anterioridad de la siguiente manera:

Ecuación 27.

Cálculo de la carga en el área tributaria.

$$\frac{Q_{viga}}{A_{viga}} = \frac{Q_{total}}{A_{total}}$$

$$Q_{viga} = \frac{Q_{total} \times A_{viga}}{A_{total}}$$

$$Q_{viga} = \frac{723,3 \text{ N/m}^2 \times 0,21m^2}{0,42m^2}$$

$$Q_{viga} = 361,6 \text{ N/m}^2$$

Nota. Carga que actúa sobre el área tributaria de las vigas en la sección 2.

Luego se trasladó la carga que actúa sobre toda el área tributaria de la viga; como una carga distribuida directamente sobre ella en unidades de fuerza por longitud de la siguiente manera:

Ecuación 28.

Carga distribuida en la viga.

$$P_{viga} = Q_{viga} \times L$$

$$P_{viga} = 361,6 \text{ N/m}^2 \times 0,6m$$

$$P_{viga} = 217 \text{ N/m}$$

Nota. Carga distribuida sobre la viga en unidades de fuerza por longitud.

Ya con la carga directamente sobre la viga se procedió a realizar cálculos estáticos sobre la viga 9-10 únicamente, ya que debido a su simetría la viga 11-12 cuenta con valores de igual magnitud; se realiza a través del siguiente diagrama de cuerpo libre.

4.5.1.b.a Cálculo viga 9-10.

Figura 22.

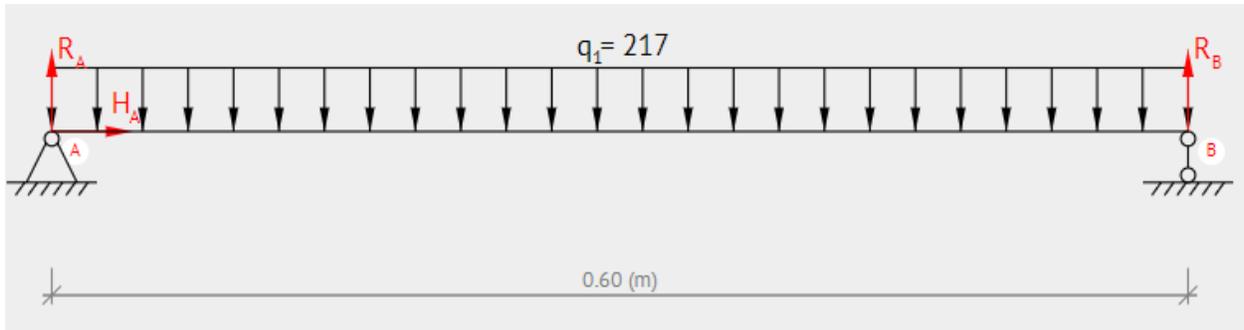


Diagrama de cuerpo libre sobre la viga 9-10.

Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Una vez planteado el problema sobre la viga se hallaron las reacciones que provoca la carga distribuida en cada uno de los apoyos, iniciando por transformar la carga distribuida en carga puntual de la siguiente manera:

Ecuación 29.

Cambio de carga distribuida a carga puntual.

$$P_{Pviga} = P_{viga} \times L$$

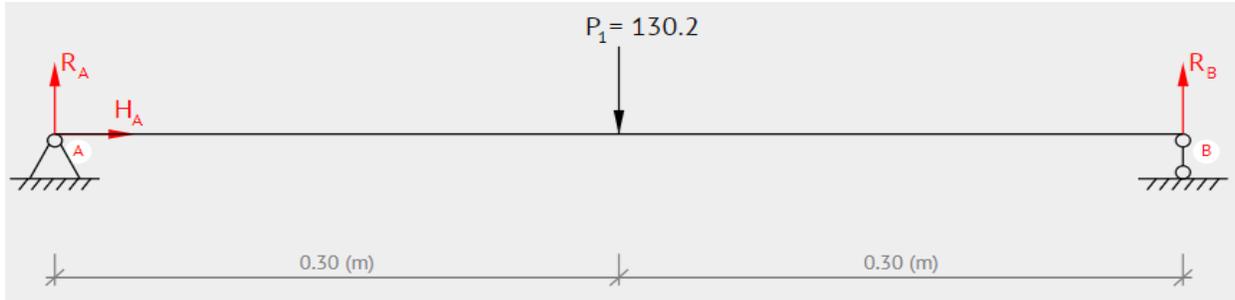
$$P_{Pviga} = 217 \text{ N/m} \times 0,6 \text{ m}$$

$$P_{Pviga} = 130,2 \text{ N}$$

Nota. Carga puntual sobre la viga 9-10.

Figura 23.

Diagrama de cuerpo libre con carga localizada en la viga 9-10.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Posteriormente se hallaron las reacciones que genera la carga puntual sobre la viga 9-10 a través de la ecuación de equilibrio y momento flector evaluados en el apoyo 9.

Ecuación 30.

Ecuación de equilibrio de fuerza puntual aplicada en la viga 9-10.

$$\begin{aligned}\Sigma F_Y &= 0 \\ 0 &= R_9 - P_{pviga} + R_{10} \\ 0 &= R_9 - 130,2N + R_{10}\end{aligned}$$

Nota. Sumatoria de fuerzas que actúan en el eje Y sobre la viga 9-10

Ecuación 31.

Ecuación de momento con respecto al apoyo 9.

$$\begin{aligned}\Sigma M_9 &= 0 \\ 0 &= -(130,2N \times 0,3m) + (R_{10} \times 0,6m) \\ 0 &= -(39,06Nm) + (R_{10} \times 0,6m) \\ R_{10} &= \frac{39,06Nm}{0,6m} \\ R_{10} &= 65,1N\end{aligned}$$

Nota. Se realiza la sumatoria de momentos con respecto a las distancias de las fuerzas aplicadas, la cual permite hallar la reacción en el apoyo 10 y así mismo la reacción R_9 por medio del despeje de la ecuación.

Despejando de la **Ecuación 30** de equilibrio.

$$0 = R_9 - 130,2N + R_{10}$$

$$R_9 = 130,2N - R_{10}$$

$$R_9 = 130,2N - 65,1N$$

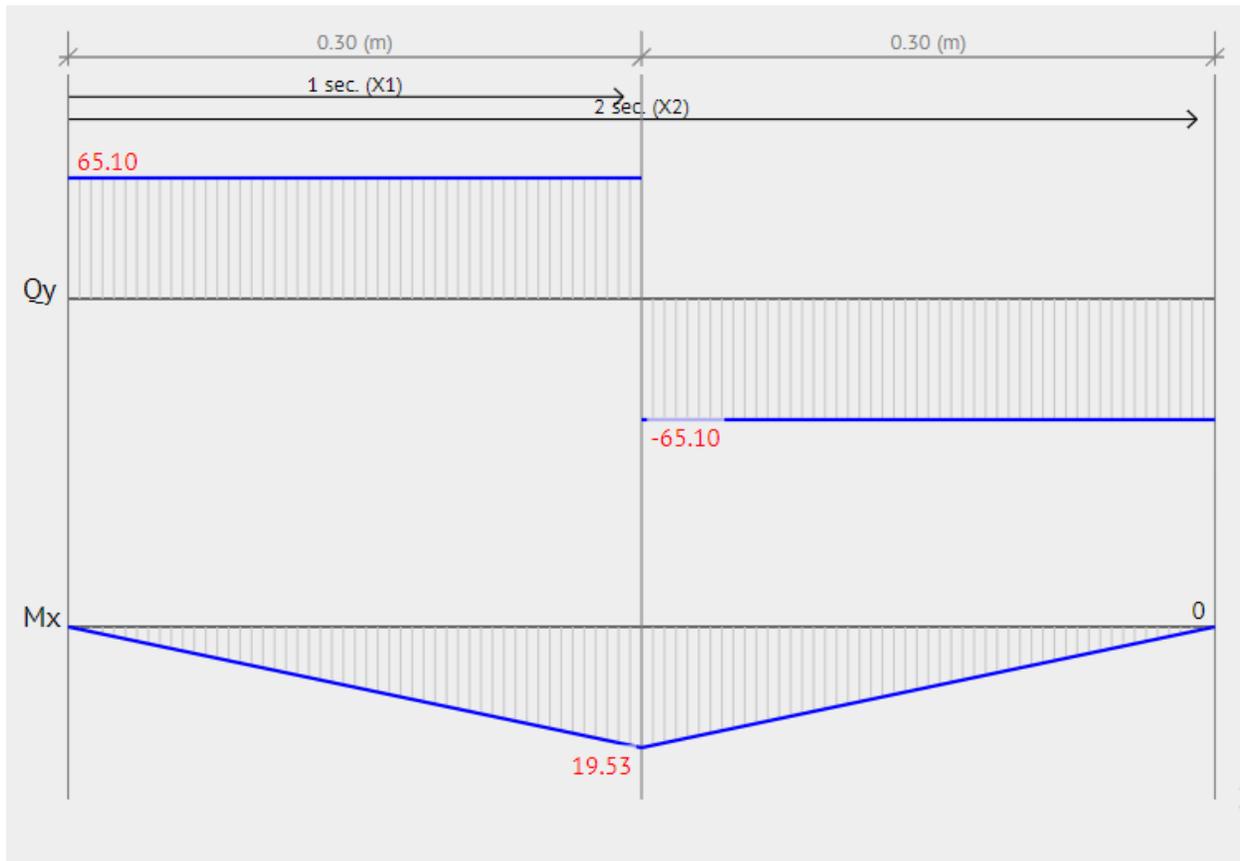
$$R_9 = 65,1N$$

Nota. La reacción que se obtiene corresponde a la reacción que generan las cargas en el apoyo 9 con respecto al apoyo 10.

Una vez definidas las reacciones que actúan sobre los apoyos, se incluyen dentro del diagrama de cuerpo libre lo que representa el sistema completamente determinado, y que permite graficar los diagramas de fuerza cortante y momento flector. Evidenciando los valores máximos que llegan a ocupar.

Figura 24.

Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector para la viga 9-10.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Para corroborar la veracidad de los diagramas que entrega Beamguru se plantearon las funciones de singularidad.

Ecuación 32.

Función de singularidad de carga en la viga.

$$W(x) = P_{viga} \langle x - 0 \rangle^0$$
$$W(x) = 130,2 \text{ N} \langle x - 0 \rangle^0$$

Ecuación 33.

Función de singularidad de fuerzas cortantes en la viga.

$$V(x) = R_9 \langle x - 0 \rangle^0 - P_{viga} \langle x - 0,3 \rangle^1$$
$$V(x) = 65,1N \langle x - 0 \rangle^0 - 130,2 N \langle x - 0,3 \rangle^1$$

Ecuación 34.

Función de singularidad de momentos flectores en la viga.

$$M(x) = R_9 \langle x - 0 \rangle^1 - \frac{1}{2} P_{viga} \langle x - 0,3 \rangle^2$$
$$M(x) = 65,1N \langle x - 0 \rangle^1 - \frac{1}{2} 130,2 N \langle x - 0,3 \rangle^2$$

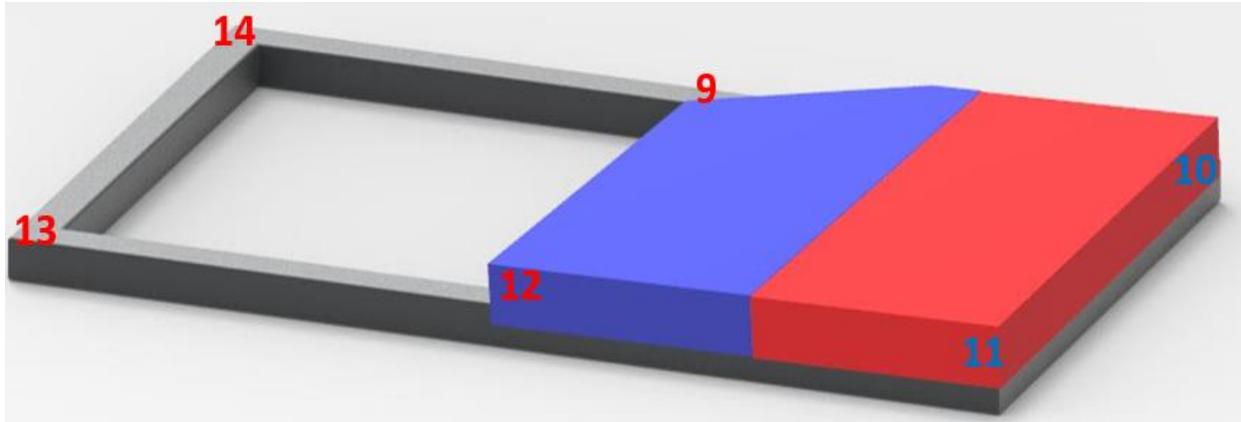
Se evaluó el momento en $X=0,3$ en la **Ecuación 34.**

$$M(0.3) = 65,1N \langle 0,3 - 0 \rangle^1 - \frac{1}{2} 130,2 N \langle 0.3 - 0,3 \rangle^2$$
$$M(0.3) = 19,53N$$

4.5.1.b.b Cálculo en la viga 9-12. También se evaluó el apoyo 9 con respecto al apoyo 12 ya que su longitud es mayor lo que representa que la carga distribuida por unidad de longitud puede afectar en mayor forma la viga.

Figura 25.

Ilustración de nivel intermedio con áreas tributarias definidas.



Nota. Nivel 2 con áreas tributarias definidas en la sección 2 de las vigas 9-12 y 10-11. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

Se realiza el cálculo para definir las áreas tributarias que le corresponden a cada viga.

Ecuación 35.

Área tributaria de la viga.

$$A_{viga} = W \times \frac{L}{2}$$

$$A_{viga} = 0,6m * \frac{0,7m}{2}$$

$$A_{viga} = 0,21m^2$$

Nota. Área tributaria correspondiente a las vigas 9-12 y 10-11.

Para establecer la carga que está en el área tributaria de la viga se realizó el cálculo a través de la regla de tres con valores que se obtuvieron con anterioridad de la siguiente manera:

Ecuación 36.

Cálculo de la carga en el área tributaria.

$$\frac{Q_{viga}}{A_{viga}} = \frac{Q_{total}}{A_{total}}$$
$$Q_{viga} = \frac{Q_{total} \times A_{viga}}{A_{total}}$$
$$Q_{viga} = \frac{723,3 \text{ N/m}^2 \times 0,21\text{m}^2}{0,42\text{m}^2}$$
$$Q_{viga} = 361,6 \text{ N/m}^2$$

Nota. Carga que actúa sobre el área tributaria de las vigas 9-12 y 10-11 en la sección 2.

Luego se trasladó la carga que actúa sobre toda el área tributaria de la viga; como una carga distribuida directamente sobre ella en unidades de fuerza por longitud de la siguiente manera:

Ecuación 37.

Carga distribuida en la viga.

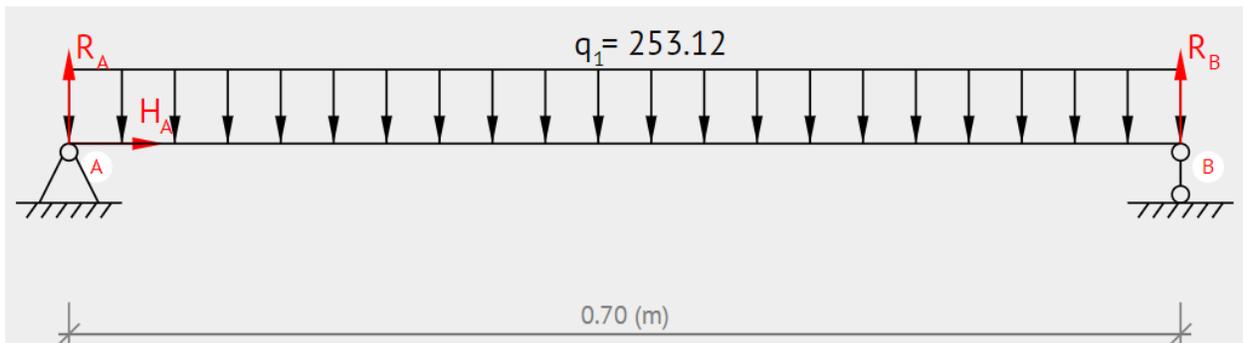
$$P_{viga} = Q_{viga} \times L$$
$$P_{viga} = 361,6 \text{ N/m}^2 \times 0,7\text{m}$$
$$P_{viga} = 253,12 \text{ N/m}$$

Nota. Carga distribuida sobre la viga en unidades de fuerza por longitud.

Ya con la carga directamente sobre la viga se procedió a realizar cálculos estáticos sobre la viga 9-12 únicamente, ya que debido a su simetría la viga 10-11 cuenta con valores de igual magnitud; se realiza a través del siguiente diagrama de cuerpo libre.

Figura 26.

Diagrama de cuerpo libre sobre la viga 9-12.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Una vez planteado el problema sobre la viga se hallaron las reacciones que provoca la carga distribuida en cada uno de los apoyos, iniciando por transformar la carga distribuida en carga puntual de la siguiente manera:

Ecuación 38.

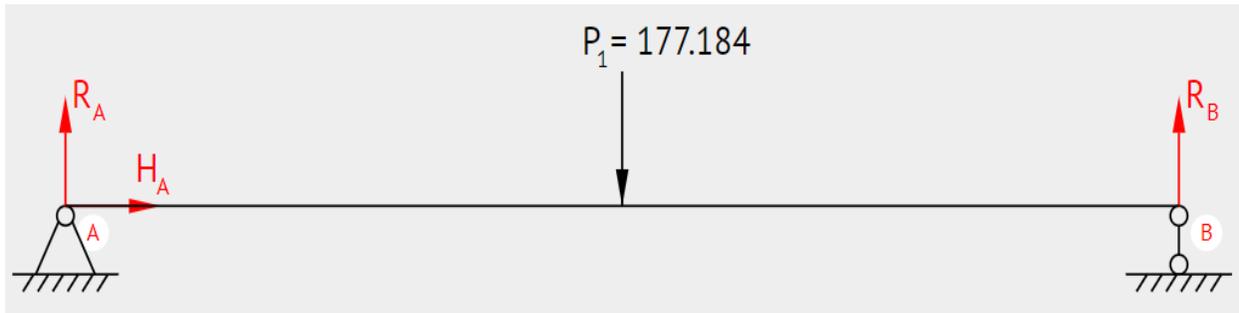
Cambio de carga distribuida a carga puntual.

$$P_{Pviga} = P_{viga} \times L$$
$$P_{Pviga} = 253,12 \text{ N/m} \times 0,7 \text{ m}$$
$$P_{Pviga} = 177,184\text{N}$$

Nota. Carga puntual sobre la viga 9-12.

Figura 27.

Diagrama de cuerpo libre con carga localizada viga 9-12.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Posteriormente se hallaron las reacciones que genera la carga puntual sobre la viga 9-12 a través de la ecuación de equilibrio y momento flector evaluados en el apoyo 9.

Ecuación 39.

Ecuación de equilibrio de fuerza puntual aplicada en la viga 9-12.

$$\begin{aligned}\Sigma F_y &= 0 \\ 0 &= R_9 - P_{pviga} + R_{12} \\ 0 &= R_9 - 177,184N + R_{12}\end{aligned}$$

Nota. Sumatoria de fuerzas que actúan en el eje Y sobre la viga 9-12

Ecuación 40.

Ecuación de momento con respecto al apoyo 9.

$$\begin{aligned}\Sigma M_9 &= 0 \\ 0 &= -(177,184N \times 0,35m) + (R_{12} \times 0,7m) \\ 0 &= -(62,0144Nm) + (R_{12} \times 0,7m) \\ R_{12} &= \frac{62,0144Nm}{0,7m} \\ R_{12} &= 88,592N\end{aligned}$$

Nota. Se realiza la sumatoria de momentos con respecto a las distancias de las fuerzas aplicadas, la cual permite hallar la reacción en el apoyo 12 y así mismo la reacción R_9 por medio del despeje de la ecuación.

Despejando de la **Ecuación 39** de equilibrio.

$$0 = R_9 - 177,184N + R_{12}$$

$$R_9 = 177,184N - R_{12}$$

$$R_9 = 177,184N - 88,59N$$

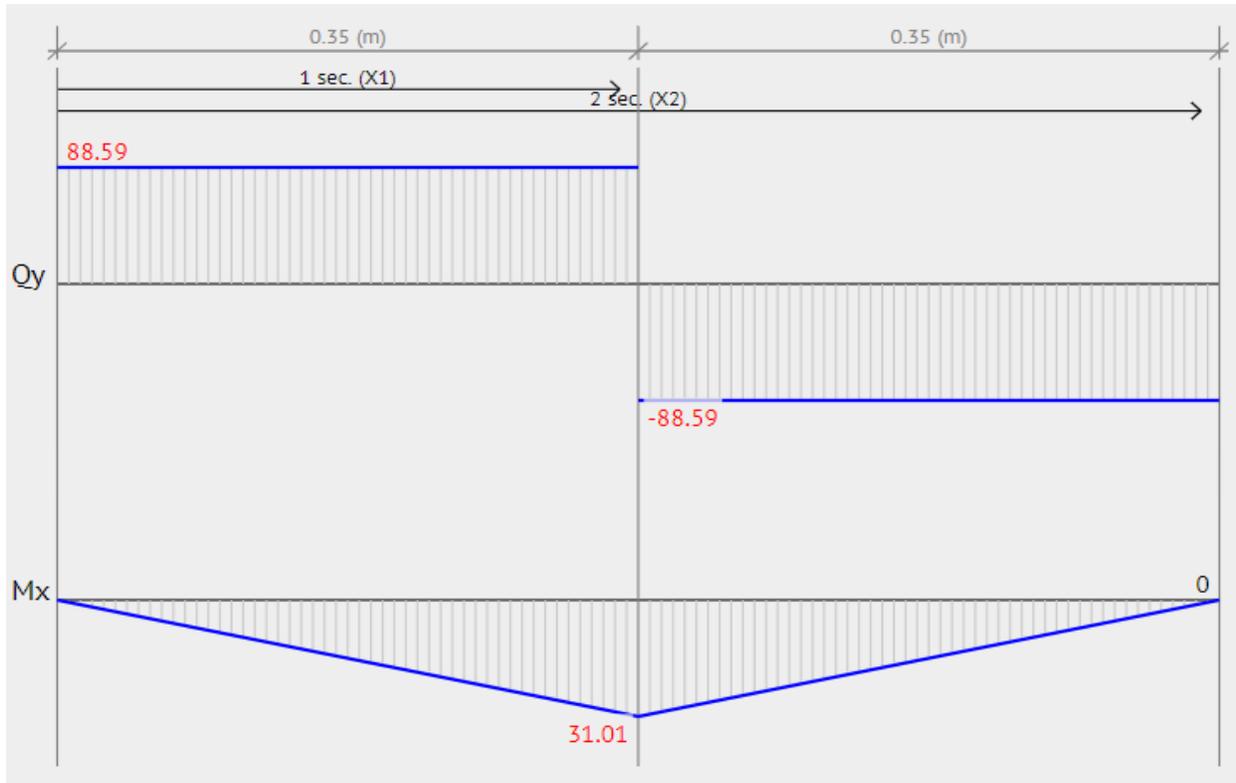
$$R_9 = 88,59N$$

Nota. La reacción que se obtiene corresponde a la reacción que generan las cargas en el apoyo 9 de la viga 9-12.

Una vez definidas las reacciones que actúan sobre los apoyos, se incluyen dentro del diagrama de cuerpo libre lo que representa el sistema completamente determinado, y que permite graficar los diagramas de fuerza cortante y momento flector. Evidenciando los valores máximos que llegan a ocupar.

Figura 28.

Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector para la viga 9-12.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Para corroborar la veracidad de los diagramas que entrega Beamguru se plantearon las funciones de singularidad.

Ecuación 41.

Función de singularidad de carga en la viga.

$$W(x) = P_{viga} \langle x - 0 \rangle^0$$
$$W(x) = 177,184 \text{ N} \langle x - 0 \rangle^0$$

Ecuación 42.

Función de singularidad de fuerzas cortantes en la viga.

$$V(x) = R_9 \langle x - 0 \rangle^0 - P_{viga} \langle x - 0,35 \rangle^1$$

$$V(x) = 88,59N \langle x - 0 \rangle^0 - 177,184 N \langle x - 0,35 \rangle^1$$

Ecuación 43.

Función de singularidad de momentos flectores en la viga.

$$M(x) = R_9 \langle x - 0 \rangle^1 - \frac{1}{2} P_{viga} \langle x - 0,35 \rangle^2$$

$$M(x) = 88,59N \langle x - 0 \rangle^1 - \frac{1}{2} 177,184N \langle x - 0,35 \rangle^2$$

Se evaluó el momento en $X=0,35$ de la **Ecuación 43.**

$$M(0.3) = 88,59N \langle 0,35 - 0 \rangle^1 - \frac{1}{2} 177,184 N \langle 0.35 - 0,3 \rangle^2$$

$$M(0.3) = 31,01N$$

4.5.1.b.c Tabla de resultados nivel 2. Las reacciones que se obtuvieron en este nivel de la estructura presentan más de una carga resultante las cuales se aplican a las columnas.

Tabla 23.

Tabla de resultados nivel intermedio.

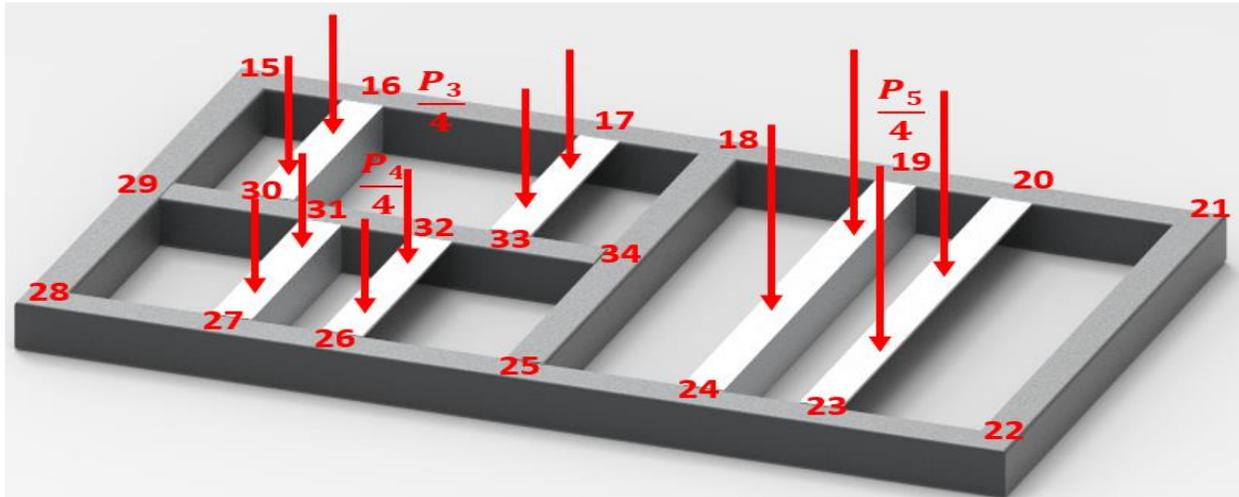
Viga	Fuerza resultante	M_{max}
9-10	$R_{9-10} = 65,1 N$ y $R_{10-9} = 65,1N$	19,53 Nm
9-12	$R_{9-12} = 88,59N$ y $R_{12-9} = 88,59N$	31,01Nm
10-11	$R_{10-11} = 88,59 N$ y $R_{11-10} = 88,59N$	31,01Nm
11-12	$R_{11-12} = 65,1 N$ y $R_{12-11} = 65,1N$	19,53 Nm

Nota. Resultados obtenidos de carga en los apoyos del nivel 2.

4.5.1.c Cálculo nivel 3. En este nivel se evidencia mayor cantidad de cargas actuando sobre las vigas, sin embargo, se presentan situaciones similares al nivel 1 donde por simetría se deducen valores de reacción en algunos de los apoyos que se especifican en el transcurso de los cálculos; se continua con nomenclatura para identificar los apoyos.

Figura 29.

Ilustración nivel inferior con nomenclatura en los apoyos y cargas aplicadas en las vigas.



Nota. Se presenta el nivel 3 con nomenclatura asignada a cada apoyo, la cual permite diferenciar y nombrar el tipo de viga que se desea evaluar y las fuerzas aplicadas sobre las vigas. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

Se define la carga aplicada sobre los ángulos que soportan el tanque de almacenamiento de vacío.

Ecuación 44.

Sumatoria de cargas que actúan sobre las vigas 16-30 y 17-33.

$$P_3 = P_{\text{tanque almacenamiento}}$$

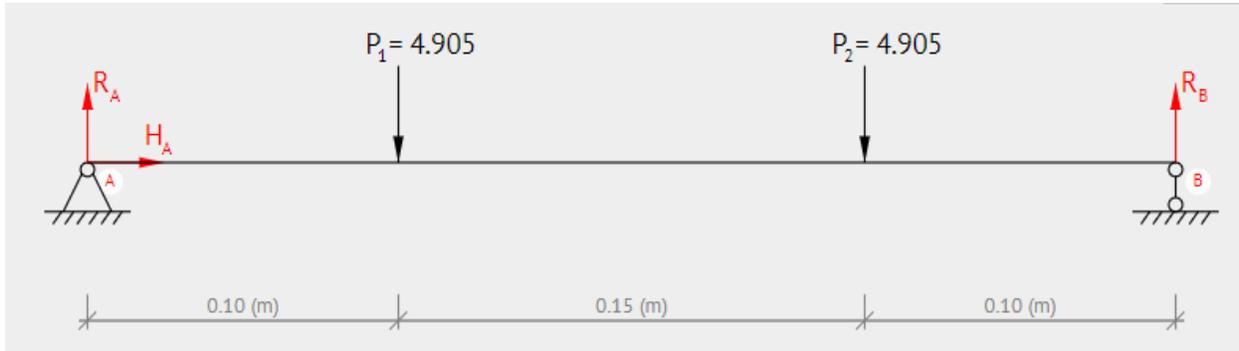
$$P_3 = 19,62N$$

Nota. El valor en Newton de la fuerza que ejerce el tanque de almacenamiento equivale a la fuerza total que se aplica sobre dichos ángulos.

4.5.1.c.a Cálculo en la viga 16-30.

Figura 30.

Diagrama de cuerpo libre con cargas y reacciones en la viga 16-30.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos, ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Ecuación 45.

Ecuación de equilibrio de fuerzas para la viga 16-30.

$$\Sigma F_Y = 0$$
$$0 = R_{16} - \frac{P_3}{4} - \frac{P_3}{4} + R_{30}$$

$$0 = R_{16} - 4,905N - 4,905N + R_{30}$$

Nota. Sumatoria de fuerzas que actúan en el eje Y sobre la viga 16-30.

Para determinar las reacciones en los apoyos 16 y 30 se acudió a la sumatoria de momentos con respecto a la posición del apoyo 16, la cual se puede determinar a través de la siguiente ecuación.

Ecuación 46.

Ecuación de momentos respecto al apoyo 16.

$$\Sigma M_{16} = 0$$
$$0 = -(4,905 \times 0,1m) - (4,905N \times 0,25m) + (R_{30} \times 0,350m)$$
$$0 = -(0,4905Nm) - (1,226Nm) + (R_{30} \times 0,350m)$$

$$R_{30} = \frac{0,4905Nm + 1,226Nm}{0,350m}$$

$$R_{30} = 4,905N$$

Nota. Se realiza la sumatoria de momentos con respecto a las distancias de las fuerzas aplicadas, las cuales permiten hallar la reacción en el apoyo 30 y así mismo la reacción R_{16} por medio del despeje de la ecuación.

Ecuación 47.

Despejando de la de equilibrio de las fuerzas para la viga 16-30.

$$0 = R_{16} - 4,905N - 4,905N + R_{30}$$

$$R_{16} = 4,905N + 4,905 - R_{30}$$

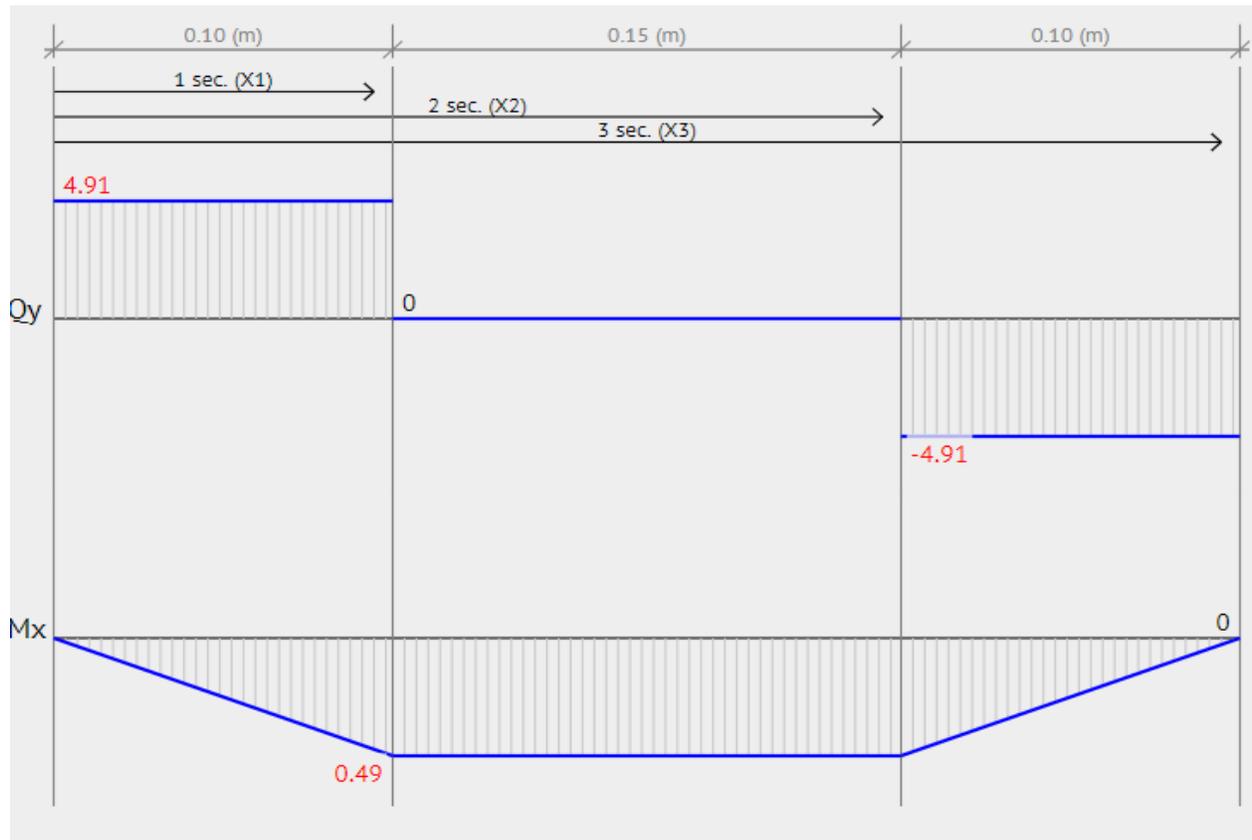
$$R_{16} = 9,81N - 4,905N$$

$$R_{16} = 4,905N$$

Nota. La reacción que se obtiene corresponde a la reacción que generan las cargas en el apoyo 16.

Figura 31.

Diagrama de fuerza cortante y momento flector para la viga 16-30.



Nota. Diagramas de fuerza cortante y momento flector de la viga 16-30. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Se obtuvieron dos reacciones que se dan a partir de las cargas puntuales que se generan en las uniones del tanque de vacío y por la condición de simetría la **viga 17-33** cuenta con reacciones idénticas de igual magnitud, pero en diferente posición; que afectan las vigas **15-18 y 29-34**.

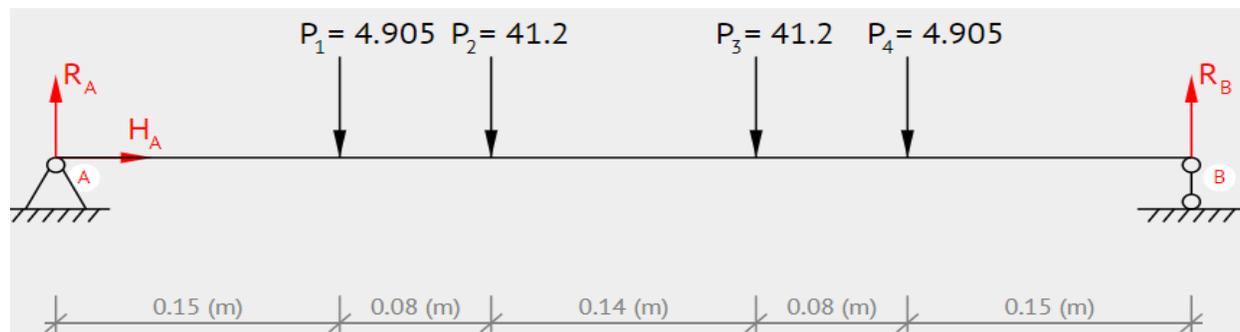
Para el caso de la viga **15-18** no actúa ninguna otra fuerza, por lo cual se verifica, pero no se incluyen los cálculos, ya que ocurre la misma situación del primer nivel, pero con fuerzas equivalentes a las cargas aplicadas generando así reacciones iguales en los apoyos 15 y 18 de $R_{15} = 4,905N$ y $R_{18} = 4,905N$.

En la **viga 27-31** ocurre lo mismo pero con la carga que genera la bomba de vacío sobre los ángulos, siendo esta equivalente a $P_{bomba\ de\ vacío} = 164,98\ N = P_4$ determinando que son 4 los puntos de apoyo se obtiene una fuerza por apoyo de **41,2N** que equivale al mismo valor debido a su simetría en las reacciones $R_{25}, R_{26}, R_{27}, R_{28}, R_{31}$ y R_{32} con respecto a la carga de la bomba de vacío.

4.5.1.c.b Cálculo en la viga 29-34. En el caso de esta viga la condición es más crítica debido a que actúan más y diferentes cargas sobre ella, por lo cual se evalúa por separado teniendo en cuenta las reacciones que actúan sobre dicha viga.

Figura 32.

Diagrama de cuerpo libre con cargas aplicadas y reacciones en la viga 29-34.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Ecuación 48.

Ecuación equilibrio de fuerzas aplicadas en la viga 29-34.

$$\begin{aligned} \Sigma F_Y &= 0 \\ 0 &= R_{29} - R_{30} - R_{31} - R_{32} - R_{33} + R_{34} \\ 0 &= R_{29} - 4,905N - 41,2N - 41,2N - 4,905N + R_{34} \end{aligned}$$

Nota. Sumatoria de fuerzas que actúan en el eje Y sobre la viga 29-34.

Para determinar las reacciones en los apoyos 29-34 se acudió a la sumatoria de momentos con respecto a la posición del apoyo 29, la cual se puede determinar a través de la siguiente ecuación.

Ecuación 49.

Ecuación de momento con respecto al apoyo 29.

$$\begin{aligned} \Sigma M_{29} &= 0 \\ 0 &= -(4,905N \times 0,15m) - (41,2N \times 0,23m) - (41,2N \times 0,37m) - (4,905N \times 0,45m) \\ &\quad + (R_{34} \times 0,6m) \\ 0 &= -(0,73575Nm) - (9,476Nm) - (15,244Nm) - (2,2072Nm) + (R_{34} \times 0,6m) \\ R_{34} &= \frac{0,73575Nm + 9,476Nm + 15,244Nm + 2,2072Nm}{0,6m} \end{aligned}$$

$$R_{34} = 46,105N$$

Nota. Se realiza sumatoria de momentos con respecto a las distancias de las fuerzas aplicadas, la cual permite hallar la reacción en el apoyo 34 y así mismo la reacción R_{29} por medio del despeje de la ecuación.

Despejando de la **Ecuación 48** de equilibrio.

$$0 = R_{29} - 4,905N - 41,2N - 41,2N - 4,905N + R_{34}$$

$$R_{29} = 4,905N + 41,2N + 41,2N + 4,905N - R_{34}$$

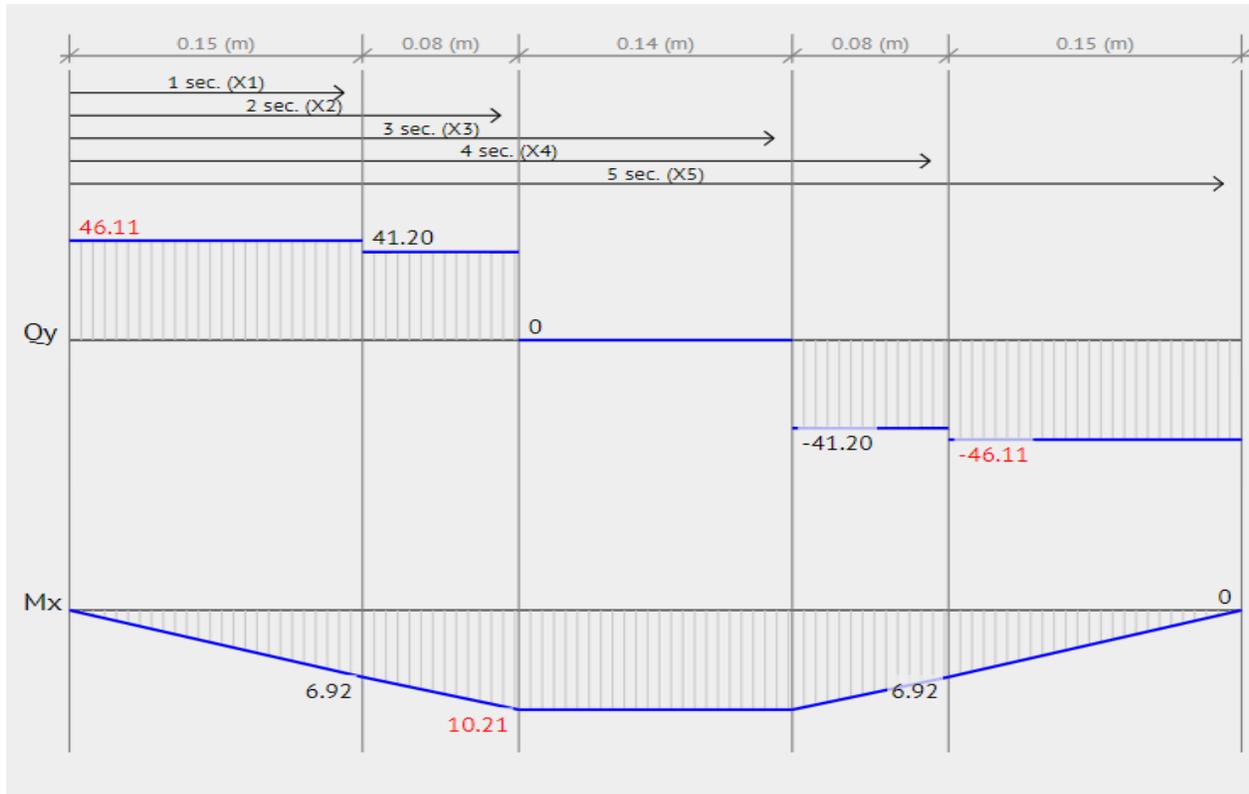
$$R_{29} = 92,21N - 46,105N$$

$$R_{29} = 46,105N$$

Nota. La reacción que se obtiene corresponde a la reacción que generan las cargas en el apoyo 29.

Figura 33.

Diagrama de fuerza cortante y momento flector para la viga 29-34.

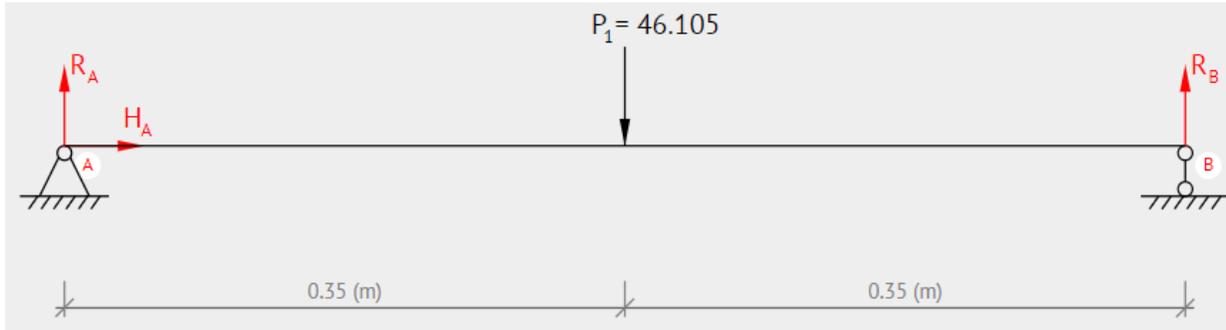


Nota. Diagramas de fuerza cortante y momento flector de la viga 29-34. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

4.5.1.c.c Cálculo en la viga 18-25. Al igual que la anterior viga se evalúa por separado ya que puede representar una condición crítica en los apoyos 18 y 25 con la fuerza resultante $R_{34} = 46,10N$.

Figura 34.

Diagrama de cuerpo libre con cargas y reacciones en la viga 18-25.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Ecuación 50.

Ecuación de equilibrio de fuerzas aplicadas en la viga 18-25.

$$\begin{aligned}\Sigma F_Y &= 0 \\ 0 &= R_{18} - R_{20} + R_{25} \\ 0 &= R_{18} - 46,105N + R_{25}\end{aligned}$$

Nota. Sumatoria de fuerzas que actúan en el eje Y sobre la viga 18-25.

Para determinar las reacciones en los apoyos 18-25 se acudió a la sumatoria de momentos con respecto a la posición del apoyo 18, la cual se puede determinar a través de la siguiente ecuación.

Ecuación 51.

Ecuación de momento con respecto al apoyo 18.

$$\begin{aligned}\Sigma M_{18} &= 0 \\ 0 &= -(46,105N \times 0,350m) + (R_{25} \times 0,7m) \\ 0 &= -(16,13Nm) + (R_{25} \times 0,6m)\end{aligned}$$

$$R_{25} = \frac{16,13Nm}{0,7m}$$

$$R_{25} = 23,05N$$

Nota. Se realiza sumatoria de momentos con respecto a las distancias de las fuerzas aplicadas, la cual permite hallar la reacción en el apoyo 25 y así mismo la reacción R_{18} por medio del despeje de la ecuación.

Despejando de la **Ecuación 50** de equilibrio.

$$0 = R_{18} - 46,105N + R_{25}$$

$$R_{18} = 46,105N - R_{25}$$

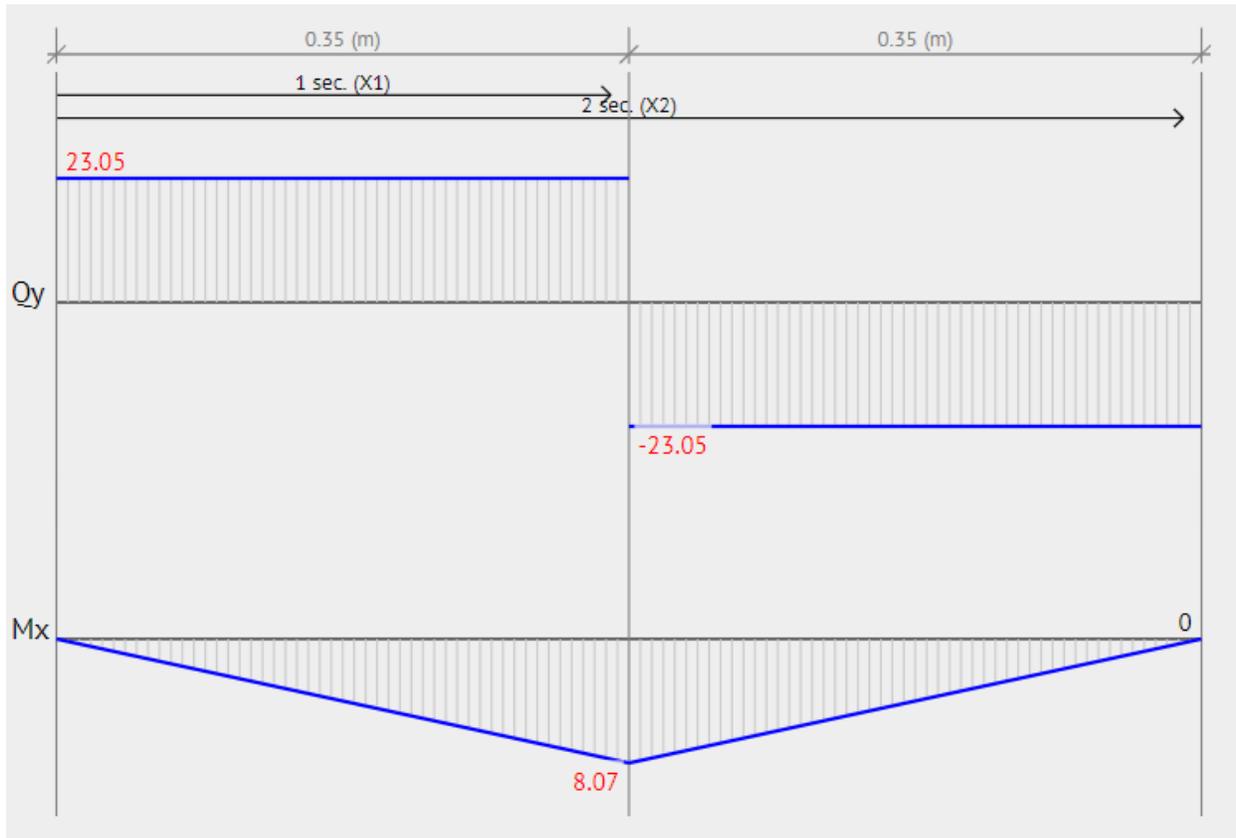
$$R_{18} = 46,10N - 23,05N$$

$$R_{18} = 23,05N$$

Nota. La reacción que se obtiene corresponde a la reacción que generan las cargas en el apoyo 18.

Figura 35.

Diagrama de fuerza cortante y momento flector viga 18-25.



Nota. Diagramas de fuerza cortante y momento flector viga 18-25. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Para los **apoyos 19-24 y 20-23** del nivel 3 o inferior, coinciden con una situación similar del nivel 1, donde se tiene una carga localizada en 4 apoyos, pero con una magnitud diferente de carga; por lo cual se determina que la carga que actúa sobre estos apoyos soporta el cilindro 2, la caja de vacío y el molde hembra o de vacío.

Ecuación 52.

Sumatoria de cargas que actúan sobre el nivel 3.

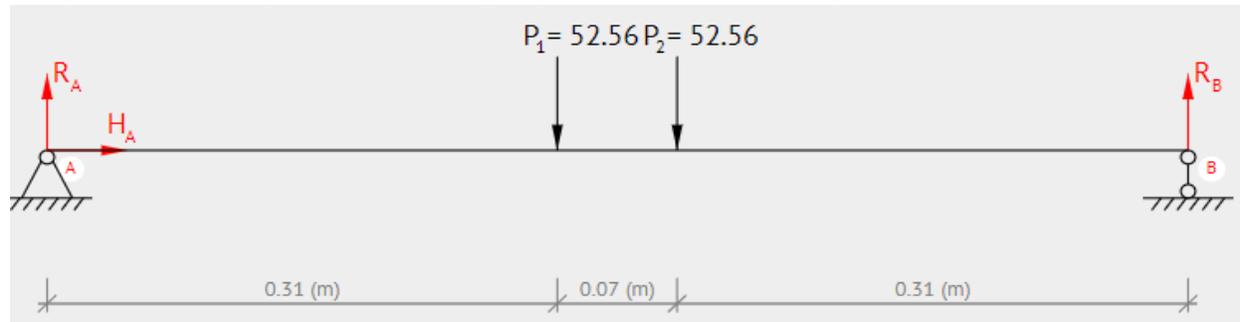
$$P_5 = P_{\text{cilindro2}} + P_{\text{Caja de vacío}} + P_{\text{molde de vacío}}$$
$$P_5 = 56,89N + 68,65N + 84,73N = 210,27N$$

Nota. Se suman los valores en Newton de las fuerzas que se aplican sobre la superficie del nivel 3.

4.5.1.c.d Cálculo en la viga 19-24.

Figura 36.

Diagrama de cuerpo libre con cargas y reacciones en la viga 19-24.



Nota. El diagrama de cuerpo libre no incluye los valores de las reacciones en los apoyos ya que se hallan posteriormente. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

Ecuación 53.

Ecuación equilibrio Viga 19-24.

$$\begin{aligned} \Sigma F_Y &= 0 \\ 0 &= R_{19} - \frac{P_5}{4} - \frac{P_5}{4} + R_{24} \\ 0 &= R_{19} - 52,56N - 52,56N + R_{24} \end{aligned}$$

Nota. Sumatoria de fuerzas que actúan en el eje Y sobre la viga 19-24.

Para determinar las reacciones en los apoyos 19 y 24 se acudió a la sumatoria de momentos con respecto a la posición del apoyo 19, la cual se puede determinar a través de la siguiente ecuación.

Ecuación 54.

Ecuación de momentos respecto al apoyo 19.

$$\begin{aligned} \Sigma M_{19} &= 0 \\ 0 &= -(52,56N \times 0,313m) - (52,56N \times 0,3865m) + (R_{24} \times 0,7m) \\ 0 &= -(16,45Nm) - (20,31Nm) + (R_{10} \times 0,7m) \\ R_{24} &= \frac{16,45Nm + 20,31Nm}{0,7m} \end{aligned}$$

$$R_{24} = 52,56N$$

Nota. Se realiza sumatoria de momentos con respecto a las distancias de las fuerzas aplicadas, la cual permite hallar la reacción en el apoyo 19 y así mismo la reacción R_{34} por medio del despeje de la ecuación.

Despejando de la **Ecuación 53** de equilibrio.

$$0 = R_{19} - 52,56N - 52,56N + R_{24}$$

$$R_{19} = 52,56N + 52,56N - R_{24}$$

$$R_{19} = 105,12N - 52,26N$$

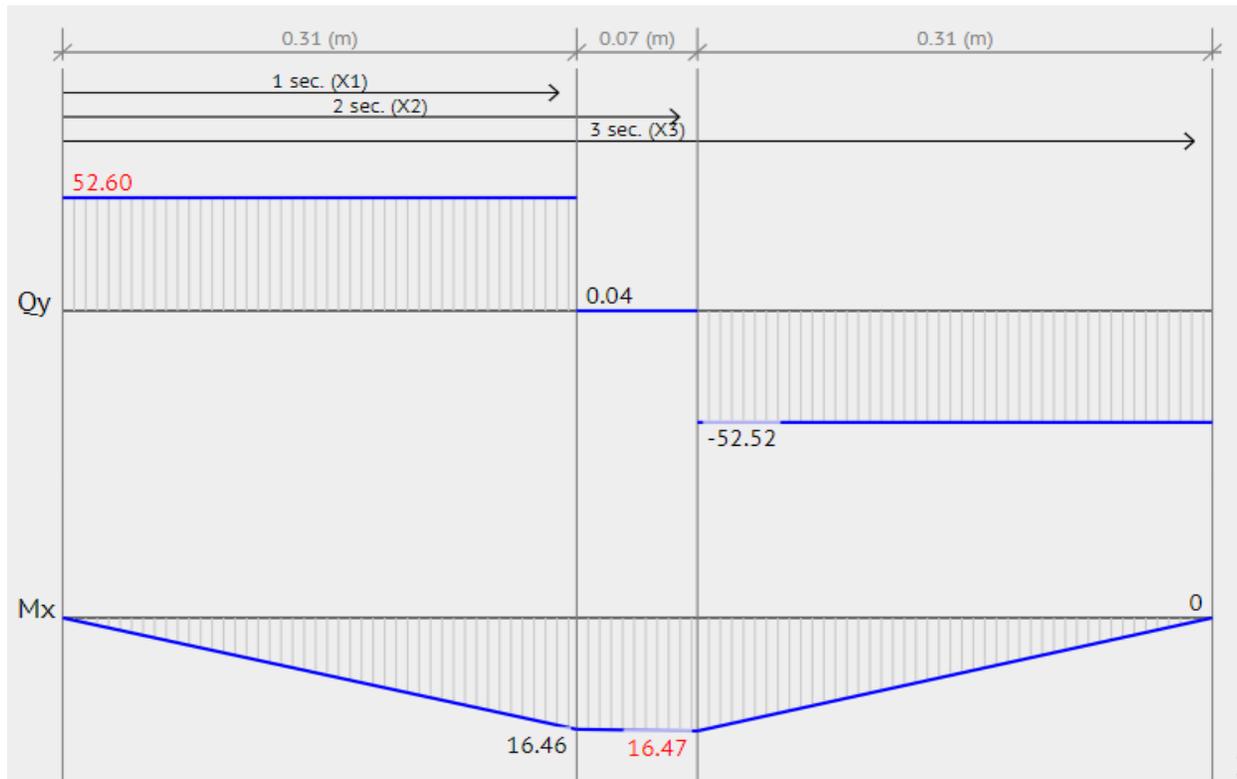
$$R_{19} = 52,36N$$

Nota. Se reacción que se obtiene corresponde a la reacción que generan las cargas en el apoyo 19.

De la misma manera de asumen los valores de las reacciones en los **apoyos 18,20,21,22,23,25** con igual magnitud respecto a la carga que se concentra en los cuatro apoyos del cilindro.

Figura 37.

Diagrama de fuerza cortante y momento flector para la viga 19-24.



Nota. Diagrama de fuerza cortante y momento flector máximo para la viga 19-24. Tomado de: Beamguru 2021 Online. Disponible en: <https://beamguru.com/online/beam-calculator/>

4.5.1.c.e Tabla de resultados nivel 3. En la siguiente tabla se observan las fuerzas resultantes en cada uno de los apoyos con respecto a la viga que se esté evaluado, durante el desarrollo del proceso no se incluyen todo el cálculo ya que es realizar la misma consecución de los pasos para obtener los resultados que se reflejan en la tabla.

Tabla 24.*Cargas aplicadas sobre las vigas del nivel 3.*

Viga	Fuerza resultante	M_{max}
15-18	$R_{15-18} = 4,905N$ y $R_{18-15} = 4,905N$	0,74Nm
29-34	$R_{29} = 46,105N$ y $R_{34} = 46,105N$	10,21Nm
25-28	$R_{25-28} = 41,2N$ y $R_{28-25} = 41,2N$	9,48Nm
18-21	$R_{18-21} = 52,56N$ y $R_{21} = 52,56N$	11,91Nm
22-25	$R_{22} = 52,56N$ y $R_{25-22} = 52,56N$	11,91Nm
15-28	$R_{15-28} = 23,05N$ y $R_{28-15} = 23,05N$	8,07Nm
16-30	$R_{16} = 4,905N$ y $R_{30} = 4,905N$	0,49Nm
27-31	$R_{27} = 41,2N$ y $R_1 = 41,2N$	3,68Nm
26-32	$R_{26} = 41,2N$ y $R_{32} = 41,2N$	3,68Nm
17-33	$R_{17} = 4,905N$ y $R_{33} = 4,905N$	0,49Nm
18-25	$R_{18-25} = 23,05N$ y $R_{25-18} = 23,05N$	8,07Nm
19-24	$R_{19} = 52,56N$ y $R_{24} = 52,56N$	16,47Nm
20-23	$R_{20} = 52,56N$ y $R_{23} = 52,56N$	16,47Nm

Nota. Fuerzas resultantes en los apoyos del nivel inferior de la estructura.

4.5.2 Selección del perfil

Se eligió por las características que presenta este material el Acero ASTM A500 que muestra las siguientes características.

- $\sigma_y = 3522 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \approx 3,45 \times 10^8 \text{ Pa}$
- $\sigma_u = 34365 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \approx 4,28 \times 10^8 \text{ Pa}$

El momento máximo se presenta en el nivel 2 en la viga 9-12 y equivale a $M_{max} = 31,01 \text{ Nm}$

4.5.2.a Módulo de sección calculado

Este se realizó de acuerdo a lo que exige la norma ASD la cual maneja un factor de seguridad del 66% del esfuerzo de fluencia.

Ecuación 55.

Esfuerzo de fluencia calculado.

$$S_{calculado} = \frac{M_{max}}{0,66 \times \sigma_y}$$
$$S_{calculado} = \frac{31,01Nm}{0,66 \times (3,45 \times 10^8 Pa)}$$
$$S_{calculado} = 1,361 \times 10^{-7} m^3 \approx 0,1361 cm^3$$

Según el catálogo de perfilería tubular de la empresa Colmena se toma como referencia un perfil de 1 ½" × 1 ½" o 40×40mm con un espesor de 2mm y se verifica que dicho perfil resista las cargas aplicadas en toda la estructura.

Figura 38.
Catálogo de perfiles cuadrados.

CARACTERÍSTICAS Y DENOMINACIÓN					PROPIEDADES ESTÁTICAS							UNIDADES DE EMPAQUE	
TAMANO PERFIL				Espesor pared e mm	PESO P kg/m	ÁREA A cm ²	FLEXIÓN			TORSIÓN			
TAMANO NOMINAL		REAL					Momento inercia I _x = I _y cm ⁴	Módulo elástico S _x = S _y cm ³	Radio de Giro r _x = r _y cm	Módulo Plástico Z _x = Z _y cm ³	Momento Inercia J cm ⁴		Módulo Elástico B cm ³
PULGADAS	MILÍMETROS	d mm	b mm										
1 X 1	25 X 25	26,70	26,70	1,50	1,16	1,48	1,51	1,13	1,01	1,35	2,49	1,71	36
1 X 1	25 X 25	26,70	26,70	2,50	1,87	2,38	2,12	1,59	0,94	2,00	3,80	2,47	36
1 1/2 X 1 X/2	40 X 40	40,00	40,00	1,50	1,73	2,20	5,49	2,75	1,58	3,22	8,77	4,13	25
1 1/2 X 1 X/2	40 X 40	40,00	40,00	2,00	2,32	2,96	6,94	3,47	1,53	4,13	11,36	5,25	25
1 1/2 X 1 X/2	40 X 40	40,00	40,00	2,50	2,81	3,58	8,22	4,11	1,51	4,97	13,79	6,25	25
2 X 2	50 X 50	51,60	51,60	1,50	2,29	2,92	12,21	4,73	2,05	5,50	19,23	7,11	25
2 X 2	50 X 50	51,60	51,60	2,00	3,10	3,95	15,63	6,06	1,99	7,12	25,05	9,13	25
2 X 2	50 X 50	51,60	51,60	2,50	3,74	4,77	18,75	7,27	1,98	8,64	30,61	10,99	25
2 X 2	50 X 50	50,00	50,00	3,00	4,25	5,41	19,47	7,79	1,90	9,39	32,53	11,84	25
2 3/4 X 2 3/4	70 X 70	70,90	70,90	1,50	3,20	4,08	32,72	9,23	2,83	10,63	50,84	13,86	16
2 3/4 X 2 3/4	70 X 70	70,90	70,90	2,00	4,32	5,50	42,38	11,96	2,78	13,88	66,66	17,97	16
2 3/4 X 2 3/4	70 X 70	70,90	70,90	2,50	5,26	6,70	51,44	14,51	2,77	16,99	81,96	21,86	16
3 X 3	75 X 75	75,00	75,00	3,00	6,60	8,41	71,62	19,10	2,92	22,49	115,14	28,81	16
3 X 3	75 X 75	75,00	75,00	4,00	8,59	10,95	90,19	24,05	2,87	28,76	148,83	36,48	16
3 X 3	75 X 75	75,00	75,00	5,00	10,48	13,36	106,33	28,35	2,82	34,46	180,41	43,33	16
3 X 3	75 X 75	75,00	75,00	6,00	12,27	15,63	120,16	32,04	2,77	39,58	209,99	49,43	16
4 1/2 X 3 1/2	90 X 90	90,20	90,20	2,00	5,57	7,10	89,47	19,84	3,55	22,88	139,26	29,80	16
4 1/2 X 3 1/2	90 X 90	90,20	90,20	2,50	6,81	8,67	109,31	24,24	3,55	28,13	171,82	36,44	16
4 X 4	100 X 100	100,00	100,00	2,00	6,07	7,74	123,01	24,60	3,99	28,30	190,75	36,94	9
4 X 4	100 X 100	100,00	100,00	3,00	8,96	11,41	177,05	35,41	3,94	41,21	279,48	53,27	9
4 X 4	100 X 100	100,00	100,00	4,00	11,73	14,95	226,35	45,27	3,89	53,30	364,04	68,31	9
4 X 4	100 X 100	100,00	100,00	5,00	14,41	18,36	271,10	54,22	3,84	64,59	444,62	82,14	9
4 X 4	100 X 100	100,00	100,00	6,00	16,98	21,63	311,47	62,29	3,79	75,10	521,39	94,85	9
	135 X 135	135,00	135,00	4,00	16,13	20,55	581,70	86,18	5,32	100,25	917,81	129,65	9
	135 X 135	135,00	135,00	5,00	19,90	25,36	704,91	104,43	5,27	122,53	1.127,65	157,44	9
	135 X 135	135,00	135,00	6,00	23,58	30,03	819,72	121,44	5,22	143,72	1.330,14	183,57	9
	150 X 150	150,00	150,00	6,00	26,40	33,63	1.145,91	152,79	5,84	179,88	1.843,64	230,58	9
	200 X 200	200,00	200,00	5,00	30,11	38,36	2.410,09	241,01	7,93	278,87	3.771,59	362,24	9
	250 X 250	250,00	250,00	7,00	52,42	66,78	6.508,73	520,70	9,87	604,58	10.241,82	783,15	6
	300 X 300	300,00	300,00	7,00	63,41	80,78	11.466,21	764,41	11,91	882,82	17.892,12	1.148,60	6

PERFIL CUADRADO

Nota. Catálogo con especificaciones de perfiles cuadrados. Tomado de: Perfil estructural tubular negro y galvanizado ASTM A500 (NTC 4526), Consorcio Metalúrgico Nacional S.A.S Colmena. Sevillana Bogotá.

Ecuación 56.

Esfuerzo de fluencia del perfil.

$$S = \frac{I}{C}$$

Donde I hace referencia al momento de inercia y C la mitad de la sección

$$S = \frac{6,94cm^4}{2cm}$$

$$S = 3,485 \text{ cm}^3 \approx 3,485 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$S > S_{\text{calculado}}$$

Al obtener estos resultados y compararlos corroboramos que el perfil seleccionado es adecuado y no sufrirá deformaciones o agrietamientos por las cargas aplicadas a lo largo de la estructura.

Para el caso de los ángulos L se tomó el mismo M_{max} que el perfil tubular, ya que es el máximo momento evaluado en toda la estructura.

$$S_{\text{calculado}} = 1,361 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \approx 0,1361 \text{ cm}^3$$

Se selecciono un perfil en L o ángulo similar al perfil tubular y se corrobore que las fuerzas que actúan sobre dicho perfil no generan ningún tipo de deformación.

Figura 39.

Catálogo de perfiles en L de lados iguales.

DESIGNACION	DIMENSIONES							AREA	PESO	PROPIEDADES ELASTICAS								
	ALTURA=ALA		RADIOS							EJE X-X = Y-Y			EJE W-W			EJE Z-Z		
	h	s	r1	r2	x=y	w	z			lx	sx	rx	lw	sw	rw	lz	sz	rz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	kg/ml	(10mm ⁴)	mm ³	mm	(10mm ⁴)	mm ³	mm	(10Mm ⁴)	mm ³	mm	
L 2.5 x 19	19.00	2.50	4.00	2.00	5.50	13.20	7.80	90.00	0.71	2.80	210.00	5.60	4.50	340.00	7.10	1.10	140.00	3.50
L 2.5 x 25	25.00	2.50	4.00	2.00	7.00	17.70	9.90	120.00	0.95	6.80	380.00	7.50	11.00	620.00	9.50	2.60	270.00	4.70
L 2.5 x 38	38.00	2.50	6.00	3.00	10.00	26.90	14.10	188.00	1.47	24.70	880.00	11.50	40.20	1,500.00	14.60	9.20	650.00	7.00
L 3 x 19	19.00	3.00	4.00	2.00	5.70	13.40	8.10	106.00	0.83	3.30	250.00	5.60	5.30	390.00	7.00	1.30	160.00	3.50
L 3 x 25	25.00	3.00	4.00	2.00	7.20	17.70	10.20	142.00	1.11	8.00	450.00	7.50	12.80	730.00	9.50	3.20	310.00	4.70
L 3 x 30	30.00	3.00	5.00	2.50	8.40	21.20	11.90	173.00	1.36	14.10	650.00	9.00	22.80	1,070.00	11.50	5.50	460.00	5.60
L 3 x 35	35.00	3.00	5.00	2.50	9.70	24.70	13.60	203.00	1.59	23.00	910.00	10.60	37.10	1,500.00	13.50	9.00	660.00	6.70
L 3 x 38	38.00	3.00	6.00	3.00	10.30	26.90	14.60	222.00	1.74	29.50	1,070.00	11.50	47.70	1,770.00	14.70	11.30	780.00	7.10
L 3 x 50	50.00	3.00	7.00	3.50	13.20	35.40	18.70	295.00	2.32	69.10	1,880.00	15.30	1,111.80	3,160.00	19.50	26.40	1,420.00	9.50
L 4.5 x 25	25.00	4.50	4.00	2.00	7.80	17.70	11.10	206.00	1.62	11.10	650.00	7.40	17.60	1,000.00	9.30	4.70	420.00	4.70
L 4.5 x 30	30.00	4.50	5.00	2.50	9.00	21.20	12.80	252.00	1.98	19.90	950.00	8.90	31.80	1,500.00	11.20	8.10	630.00	5.70
L 4.5 x 35	35.00	4.50	5.00	2.50	10.30	24.70	14.50	297.00	2.33	32.80	1,330.00	10.50	52.30	2,110.00	13.30	13.20	910.00	6.70
L 4.5 x 38	38.00	4.50	6.00	3.00	11.00	26.90	15.50	325.00	2.55	42.30	1,560.00	11.40	67.80	2,520.00	14.40	16.80	1,080.00	7.20
L 4.5 x 50	50.00	4.50	7.00	3.50	13.90	35.40	19.60	434.00	3.41	100.30	2,780.00	15.20	161.30	4,560.00	19.30	39.40	2,000.00	9.50
L 4.5 x 63	63.00	4.50	9.00	4.50	17.00	44.50	24.00	554.00	4.35	204.70	4,450.00	19.20	330.50	7,420.00	24.40	79.00	3,290.00	11.90
L 6 x 35	35.00	6.00	6.00	3.00	10.80	24.70	15.30	387.00	3.04	41.10	1,700.00	10.30	65.20	2,640.00	13.00	16.90	1,110.00	6.60
L 6 x 38	38.00	6.00	6.00	3.00	11.60	26.90	16.30	423.00	3.32	53.70	2,030.00	11.30	85.30	3,180.00	14.20	22.00	1,350.00	7.20
L 6 x 50	50.00	6.00	7.00	3.50	14.50	35.40	20.50	568.00	4.46	128.90	3,630.00	15.10	206.00	5,830.00	19.00	51.70	2,520.00	9.50
L 6 x 63	63.00	6.00	9.00	4.50	17.60	44.50	24.00	777.00	5.71	265.70	5,860.00	19.10	496.90	9,580.00	24.20	104.50	4,100.00	12.00

Nota. Catálogo de perfiles en L con lados iguales tipo Diaco. Tomado de: Catálogo de productos. Nicastillo S.A. Cartagena de Indias.

El perfil que se selecciona es el perfil L3x38 con dimensiones de 38x38 mm y espesor de 3mm.

$$S = \frac{I}{C} = 1070 \text{ mm}^3 \approx 1,07 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

El valor de esfuerzo lo brinda el fabricante, garantizando así que $S > S_{calculado}$ por lo tanto el perfil no sufrirá ningún tipo de deformación.

4.5.3 Cálculo de cargas en las columnas

Las columnas son elementos que están sometidos a compresión y deben ser capaces de resistir las cargas que ejercen los elementos sobre las vigas las cuales terminan actuando sobre la columna; para determinar estas cargas es importante determinar e identificar las reacciones que producen las vigas sobre ellas; conociendo dichos valores se identifican la totalidad de la carga por columna de la siguiente manera:

Tabla 25.

Cargas que actúan sobre las columnas.

Columna	Cargas que actúan sobre la columna	Valor de las cargas que actúan en la columna	Carga total
Columna 1-25	$R_1 - R_{9-12} - R_{11-12}$ $-R_{18-25} - R_{22-25}$ $-R_{25-28}$	78,4N+88,59N+65,1N+23,05 N+52,56N+41,2N	348,9N
Columna 4-22	$R_4 - R_{10-11} - R_{11-12}$ $-R_{22}$	78,4N+88,59N+65,1N+52,56 N	284,65N
Columna 5-21	$R_5 - R_{9-10} - R_{10-11}$ $-R_{21}$	78,4N+65,1N+88,59N+52,56 N	284,65N
Columna 8-18	$R_8 - R_{9-10} - R_{9-12}$ $-R_{15-18} - R_{18-21}$ $-R_{18-25}$	78,4N+65,1N+88,59N+4,905 N+52,56N+23,05N	312,605N

Nota. Se identifican las cargas que provocan las reacciones sobre las columnas.

Tabla 26.

Cargas que actúan sobre la sección de columna.

Sección libre de columna	Cargas que actúan sobre la sección	Valor de las cargas que actúan en la sección	Carga total
Sección 1-12	$R_1 - R_{9-12} - R_{11-12}$	78,4N+88,59N+65,1N	232,09N
Sección 12-25	$R_{9-12} - R_{11-12}$ $-R_{18-25} - R_{22-25}$ $-R_{25-28}$	88,59N+65,1N+23,05N+52,5 6N+41,2N	270,5N
Sección 4-11	$R_4 - R_{10-11} - R_{11-12}$	78,4N+88,59N+65,1N	232,09N
Sección 11-22	$R_{10-11} - R_{11-12}$ $-R_{22}$	88,59N+65,1N+52,56N	206,25N
Sección 5-10	$R_5 - R_{9-10} - R_{10-11}$	78,4N+65,1N+88,59N	232,09N
Sección 10-21	$R_{9-10} - R_{10-11}$ $-R_{21}$	65,1N+88,59N+52,56N	206,25N
Sección 8-9	$R_8 - R_{9-10} - R_{9-12}$	78,4N+65,1N+88,59N	232,09N
Sección 9-18	$R_{9-10} - R_{9-12}$ $-R_{15-18} - R_{18-21}$ $-R_{18-25}$	65,1N+88,59N+4,905N+52,5 6N+23,05N	234,205N

Nota. Se divide en secciones libres de columna para determinar la más crítica.

4.5.3.a Cálculos de carga crítica en las columnas. Se realizó la tabla 26 con el fin de identificar la columna con mayor probabilidad de pandeo debido al valor de la carga que actúa sobre ella, y se procedió a efectuar el cálculo de carga crítica; para determinar la carga crítica se requiere la siguiente información del perfil seleccionado.

- ✓ Módulo de elasticidad del acero ASTM 500 (E) = $200 \times 10^9 Pa$
- ✓ Momento de inercia (I) = $6,94 \times 10^{-8} m^4$
- ✓ Área del perfil (A_{Perfil}) = $2,96 \times 10^{-4} m^2$
- ✓ Esfuerzo de fluencia del acero ASTM 500 (F_y) = $3,45 \times 10^8 Pa$
- ✓ Longitud de la sección 12-25 (más crítica) = 0,75m

✓ Radio de giro (r_{giro})= 0,01123m

Ecuación 57.

Carga crítica de las columnas.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * I * E}{l^2}$$
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times 6,94 \times 10^{-8} m^4 \times 200 \times 10^9 Pa}{(0.75m)^2}$$
$$P_{cr} = 243,53 \times 10^3 N$$

Nota. La carga crítica que se obtiene del cálculo debe ser mayor que la carga de mayor valor que actúa sobre la columna.

Se cálculo el esfuerzo crítico teniendo en cuenta las condiciones de pandeo y los apoyos en que se encuentran todas las columnas con un valor de $K=1$ permitiendo evaluar los valores de $\frac{KL}{r_{giro}}$ y $4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ para determinar la ecuación que permite obtener el esfuerzo crítico sobre la columna.

Ecuación 58.

Criterio de relación de esbeltez $\frac{KL}{r_{giro}}$ de las columnas.

$$\frac{KL}{r_{giro}} = \frac{1 \times 0,75m}{0.0153m}$$
$$\frac{KL}{r_{giro}} = 49,01$$

Nota. El valor de criterio de relación de esbeltez no supera los 200.

Ecuación 59.

Criterio $4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ para cálculo de esfuerzo crítico.

$$4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4,71 \sqrt{\frac{200 \times 10^9 Pa}{3,45 \times 10^8 Pa}}$$

$$4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 113,40$$

Nota. El valor de este criterio se comparó con la relación de esbeltez, y se evidencia que la relación de esbeltez es menor lo cual indica que se debe usar la ecuación que

indica $4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} > \frac{KL}{r_{giro}}$ para determinar el esfuerzo crítico.

Antes de hacer uso de la ecuación que se define, se debe primero hallar el esfuerzo de Euler.

Ecuación 60.

Esfuerzo de Euler para columnas.

$$F_e = \frac{\pi^2 \times E}{\left(\frac{K \times L}{r_{giro}}\right)^2}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \times 200 \times 10^9 Pa}{\left(\frac{1 \times 0,95m}{0,0153m}\right)^2}$$

$$F_e = 8,21 \times 10^8 Pa$$

Nota. El esfuerzo de Euler se reemplaza en la ecuación para hallar el esfuerzo crítico.

Ecuación 61.

Esfuerzo crítico para columnas.

$$F_{cr} = \left(0,658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y$$

$$F_{cr} = \left(0,658 \frac{3,45 \times 10^8 Pa}{8,21 \times 10^8 Pa}\right) 3,45 \times 10^8 Pa$$

$$F_{cr} = 289,35 \times 10^6 Pa$$

Nota. El factor dl esfuerzo critico debe estar acompañado de un factor de seguridad.

Basándose en la norma ASD que indica que el esfuerzo crítico debe contar con un factor de seguridad especificado en 0,6 para garantizar una tolerancia en las cargas que se le aplican al perfil.

Ecuación 62.

Esfuerzo admisible para columnas.

$$F_{admisible} = 0,6 F_{cr}$$
$$F_{admisible} = 0,6 * 289,35 \times 10^6 Pa$$
$$F_{admisible} = 173,6 \times 10^6 Pa$$

Nota. Este esfuerzo determina la carga admisible que puede ser aplicada.

Con el valor de esfuerzo admisible se procedió a determinar la carga máxima admisible que se puede aplicar al perfil sin que esta sufra algún tipo de deformación por pandeo.

Ecuación 63.

Carga admisible para columnas.

$$R_{admisible} = A_{perfil} * F_{admisible}$$
$$R_{admisible} = 2,96 \times 10^{-4} m^2 * 173,6 \times 10^6 Pa$$
$$R_{admisible} = 51,38 \times 10^3 N$$

Nota. Carga máxima que soporta la estructura.

El valor de carga máxima que puede soportar cada columna demuestra que la estructura de la máquina de termoformado multifuncional, no presentara daño por las fuerzas o cargas en las que se encuentra sometida.

4.5.4 Elementos finitos

Se realizo un estudio estático línea con apoyo del sistema de elementos finitos que brinda el Cad Solid Edge a través de un mallado tetraédrico en la estructura que será fabricada con perfilería tubular con un tamaño de 1 ½" ×1 ½" y ángulos L3×38 en Acero estructural con las siguientes características.

Tabla 27.

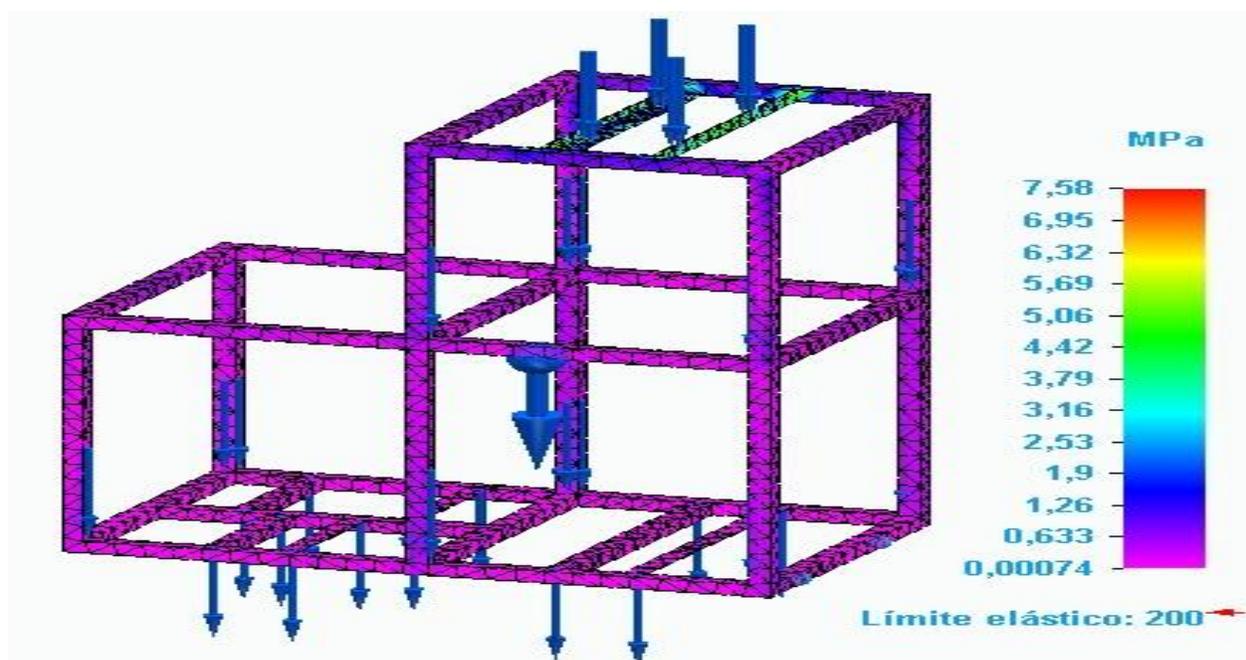
Características de acero estructural.

Propiedad	Valor
Densidad	7833,000 kg/m ³
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C
Conductividad térmica	0,032 kW/m-C
Calor específico	481,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	199947,953 MPa
Coefficiente de Poisson	0,290
Límite elástico	200,001 MPa
Tensión de rotura	358,527 MPa
% de elongación	0,000

Nota. Tabla de propiedades del acero estructural tomado de Informe de simulación de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

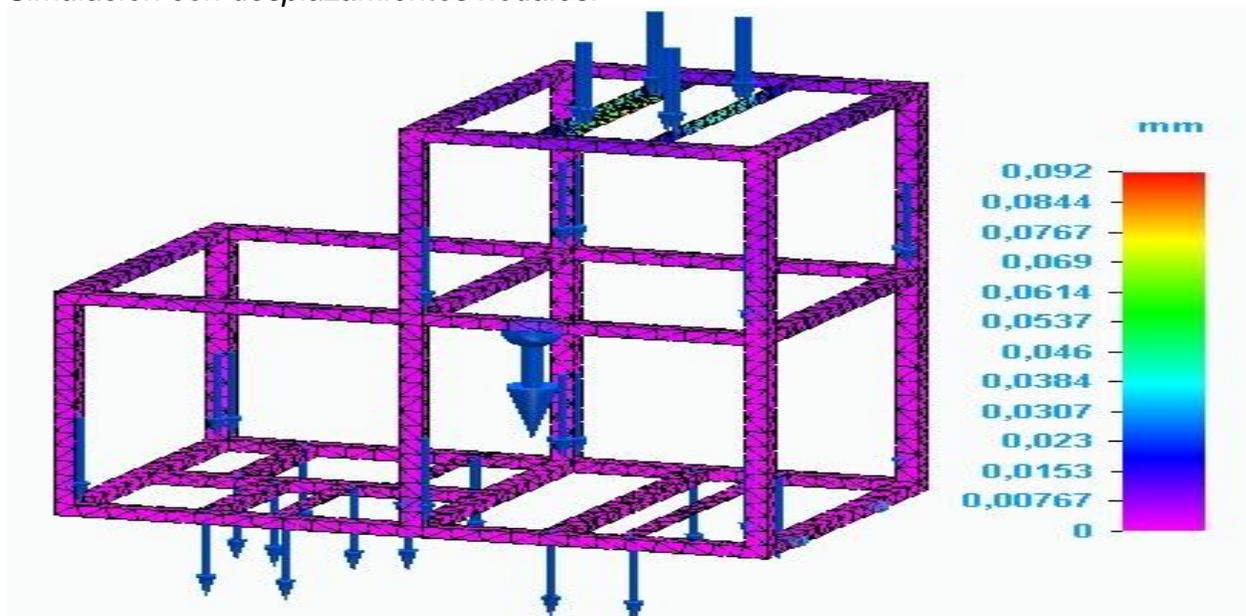
A continuación, se muestra el resultado que arroja la correspondiente simulación del diseño de la estructura propuesta para la máquina de termoformado multifuncional.

Figura 40.
Simulación con esfuerzo de Von Mises.



Nota. Estructura con simulación de esfuerzos de Von Mises. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

Figura 41.
Simulación con desplazamientos nodales.



Nota. Estructura con desplazamientos nodales. Tomado de: Software Solid Edge 2021.CAD.Siemens PLM software, 2020.

El estudio se realizó con la finalidad de soportar los cálculos obtenidos con anterioridad; de este mismo se puede concluir que el elemento que mayor esfuerzo de Von Mises estará sometido y mayor desplazamiento (insignificante) son los ángulos que soportan el sistema desplazamiento del cilindro 2 y la plataforma de soplado en el primer nivel; que durante los cálculos teóricos realizados, es el segundo elemento que mayor carga recibe; ya que en el nivel 2 las vigas cuentan con una carga mayor, pero con una placa ó lámina en la sección 2 que distribuye la fuerza por unidad de área haciendo que el esfuerzo y desplazamiento a los cuales están sometidos sea menor por parte de los sistemas.

Por otra parte, los esfuerzos y desplazamientos máximos arrojados en la simulación resultan ser insignificantes lo que representa, que la selección del material, el cálculo teórico realizado, la selección de los perfiles y el diseño propuesto garantizaran que la estructura no sufra ningún tipo de falla por las cargas que actúan sobre ella.

5. MANUAL INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN CON SUS RESPECTIVAS GUÍAS DE LABORATORIO Y MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA

5.1 Manual instructivo de operación

El equipo de termoformado multifuncional lleva acabo su proceso de formado de plástico en los tres principales tipos de termoformado por vacío, por presión positiva y molde y contra molde, dando la posibilidad de combinar este tipo de técnicas para obtener geometrías de mayor calidad, para su correcto uso y minimización de cualquier tipo de error se debe tener en cuenta primero algunos criterios de seguridad que se definieron.

5.1.1 Seguridad

- ✓ No hacer uso de la máquina sin antes haber leído y comprendido el contenido del instructivo de uso.
- ✓ La máquina no debe ser operada por más de una persona.
- ✓ Verifique de manera visual el estado de los componentes de la termoformadora.
- ✓ Confirme el voltaje de suministro de energía eléctrica para cada sistema, calentamiento 220v, bomba de vacío 110v.
- ✓ Antes de conectar las fuentes de corriente verifique que no esté activo ningún sistema.
- ✓ Compruebe y ajuste los acoples rápidos del sistema neumático.
- ✓ Verifique que la máquina se encuentra nivelada.
- ✓ Retire cualquier tipo de material inflamable que este cerca del sistema de calentamiento.
- ✓ Asegúrese de que el espacio donde será operada la máquina se encuentre con una correcta ventilación.
- ✓ Preste atención a las etiquetas con simbología que advierten el peligro que representa el sistema donde estén ubicadas.
- ✓ Verifique que el manómetro en el tanque de vacío no exceda su límite de operación equivalente a 125 psi.
- ✓ Si observa algún tipo de anomalía no intente repararla usted mismo, si no solicite intervención por expertos en mantenimiento.
- ✓ Compruebe el nivel de aceite lubricante en la bomba de vacío.

- ✓ No intente formar un material diferente al plástico.
- ✓ Haga uso de guantes de carnaza para manipular la lámina semielaborada.
- ✓ Quitar objetos externos como audífonos, cadenas, manillas y relojes que puedan presentar atascamiento; y mantener recogido el cabello.
- ✓ En caso de presentar cualquier tipo de accidente accione el paro de seguridad.

5.1.2 Simbología

La siguiente tabla fue construida con información obtenida por el catálogo general de señales de seguridad en el trabajo de SS Covadonga alta visibilidad y seguridad [13].

Tabla 28.

Descripción de señales.

Símbolo	Descripción
	Señal de advertencia que representa peligro o riesgo eléctrico por circulación de corriente eléctrica de alta tensión.
	Señal de advertencia que representa peligro por superficie caliente.
	Señales de advertencia que representan peligro de atrapamiento.
	Señal de advertencia que representa movimiento en el sistema.
	Señal de advertencia que representa presencia de aire comprimido.
	Señal que prohíbe intervenir la máquina de personal no autorizado.
	Señales informativas que representan el uso obligatorio de los elementos de protección personal para el uso de la máquina.

Nota. Descripción de señales preventivas, informativas y obligatorias con las que cuenta la máquina, Tomado de: Catálogo general de señales de seguridad 2018. SS Covadonga alta visibilidad y seguridad, Madrid. Disponible en: <https://n9.cl/ad7be>

Por otra parte, el panel de control de la máquina de termoformado multifuncional, cuenta con simbología básica, que permite identificar la función que cumple cada elemento de instrumentación que hace parte de él, sin embargo, se especifica la selección del sistema de control temporizador a continuación y posteriormente se describen el resto de elementos en la **tabla 29** con su correspondiente función que cumple cada elemento.

Se realiza la selección de un temporizador digital multifunción Ref 75495 tipo industrial, de acuerdo a los requerimientos de tiempo y voltaje de cada sistema donde tendrá como principal función la conexión y desconexión de los sistemas de calentamiento, soplado y vacío a la corriente eléctrica; lo cual permitirá el accionamiento de las resistencias eléctricas tubulares, apertura de electroválvulas 3/2 del sistema de soplado y vacío respectivamente, dicho temporizador cuenta con las siguientes características:

Indicación de Estado en Panel: LED Rojo - Relé ON.
Display: 3 dígitos LCD.
Rango de tiempos: Mínimo 0,1s Máximo 999h.
Funciones (8): 1. ON Delay (Retardo a la conexión) - 2. Cíclico OFF/ON - 3. Cíclico ON/OFF - 4. Señal ON/OFF -5. Señal OFF Delay (Retardo a la desconexión) - 6. Intervalo - 7. Señal OFF/ON -8. Salida One Shot (Pulso momentáneo).
Alimentación: 24-240V AC/DC 50/60Hz.
Consumo de Energía: 0.5VA (24/48VAC), 4VA (110 a 265V AC/DC).
Salida de control: 1 Relé C/O.
Capacidad de Contactos: 8A 240VAC/ 24DC (Carga Resistiva).
Material de los contactos: AgSnO₂ (Óxido de estaño y plata).
Grado de Protección: IP20 para los terminales, IP40 para el alojamiento.
Peso: 85g. [14]

La función que se recomienda usar es la N° 8 de salida One shot que mantiene el pulso activo o entrega de corriente durante el tiempo especificado y luego retorna de forma automática a su estado inicial, es decir impide el paso de corriente.

Tabla 29.

Descripción de panel de control.

Símbolo	Descripción
	<p>Hace referencia al paro de emergencia, encargado de cortar cualquier tipo de acción que se esté generando durante el proceso de formado cuya finalidad es evitar graves accidentes.</p>
	<p>Temporizador digital, encargado de mostrar el conteo y cantidad de tiempo que actúa cada sistema sobre la lámina; se ubica bajo cada pulsador.</p>
	<p>Controlador de temporizador digital; permite aumentar, disminuir la cantidad de tiempo que cada sistema actúa sobre la lámina.</p>
	<p>Pulsador con coloración amarilla; encargado de encender el sistema de calentamiento para deformar la lámina de polímero.</p>
	<p>Pulsador con coloración blanca; encargado de encender el sistema de vacío para evacuar el aire que se almacena entre el molde y la lámina.</p>
	<p>Pulsador con coloración azul; encargado de encender el sistema de soplado para forzar al polímero a tomar la forma del molde a través de presión positiva.</p>
	<p>Pulsador con coloración negra y flecha apuntando al norte; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°1 que desplaza el conjunto de vacío hacía arriba.</p>
	<p>Pulsador con coloración negra y flecha apuntando al sur; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°1 que desplaza el conjunto de vacío hacía abajo.</p>

	Pulsador con coloración verde y flecha apuntando al sur; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°2 que desplaza el conjunto de soplado hacía abajo.
	Pulsador con coloración verde y flecha apuntando al norte; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°2 que desplaza el conjunto de soplado hacía arriba.

Nota. Descripción de elementos de instrumentación que controlan los sistemas que conforman la máquina de termoformado.

Figura 42.

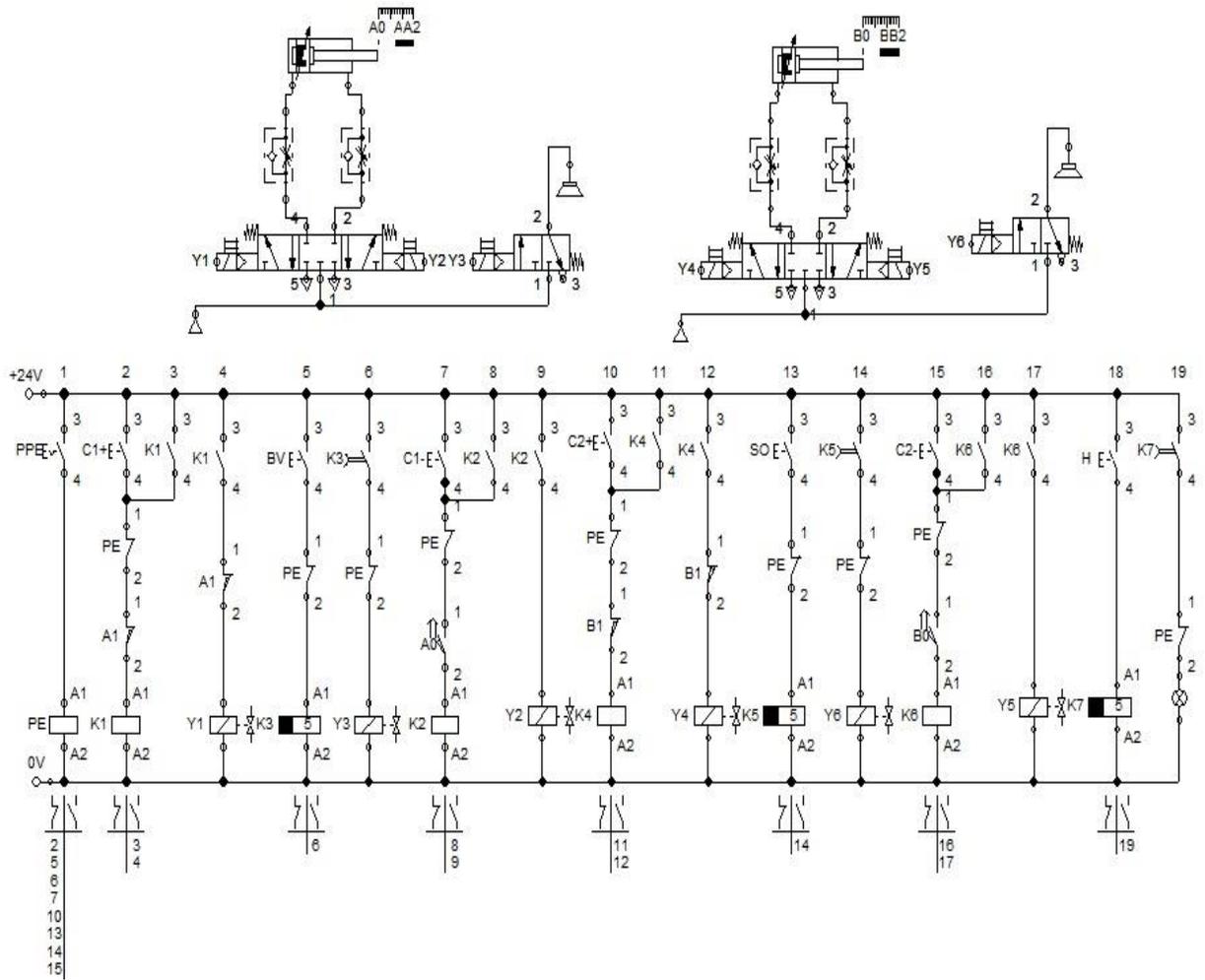
Panel de control de termoformadora.



Nota. Panel del control completo de la máquina de termoformado multifuncional.

Figura 43.

Diagrama de instrumentación circuito termoformado.



Nota. Circuito de instrumentación de panel de control de la máquina termoformadora multifuncional. Tomado de: Fluidsim, Design Simulate Learn, Festo 2021.

A continuación, se describe la nomenclatura de cada elemento que conforma el circuito de instrumentación.

Tabla 30.

Nomenclatura de instrumentación.

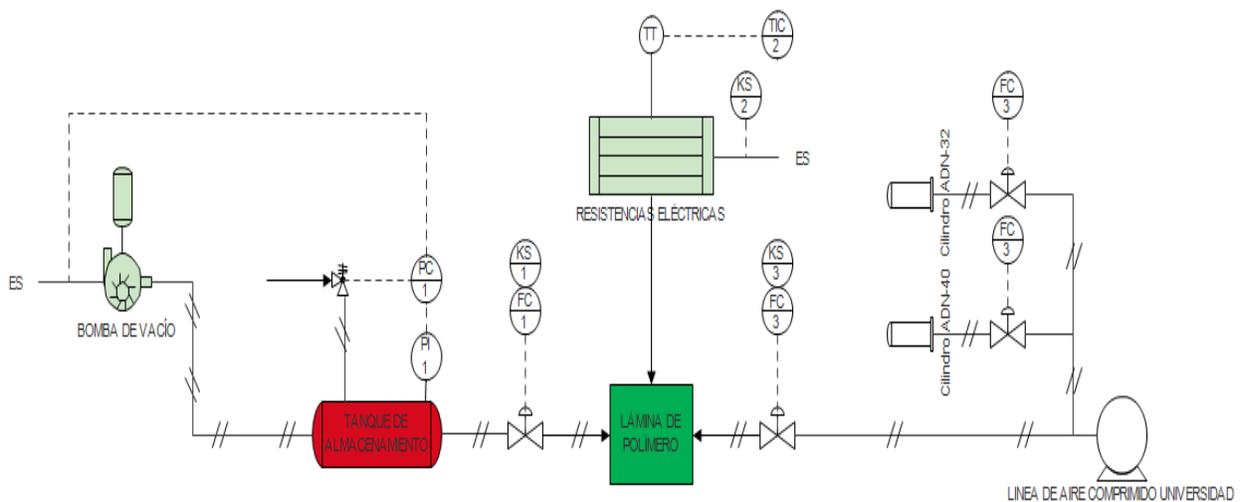
Nomenclatura	Descripción
PPE	Pulsador paro de emergencia
PE	Relé y contacto paro de emergencia
C1+	Pulsador activación cilindro ADN-32
BV	Pulsador activación bomba de vacío
C1-	Pulsador retroceso cilindro ADN-32
C2+	Pulsador activación cilindro ADN-40
C2-	Pulsador retroceso cilindro ADN-40
SO	Activación sistema soplado
H	Activación sistema de calentamiento
K1	Relé controlador desplazamiento positivo cilindro ADN-32
K2	Relé controlador desplazamiento negativo cilindro ADN-32
K4	Relé controlador desplazamiento positivo cilindro ADN-40
K6	Relé controlador desplazamiento negativo cilindro ADN-40
K3	Relé temporizador con retardo a la conexión de vacío
K5	Relé temporizador con retardo a la conexión de soplado
K7	Relé temporizador con retardo a la conexión de calentamiento
Y1, Y2, Y3, Y4, Y6	Solenoides de válvulas

Nota. Nomenclatura de elementos que conforman el sistema de instrumentación.

Y se adjunta plano del sistema de control, con nomenclatura P&ID en cada uno de los elementos que conforman dicho sistema.

Figura 44.

Plano P&ID del sistema de control de la máquina de termoformado multifuncional.



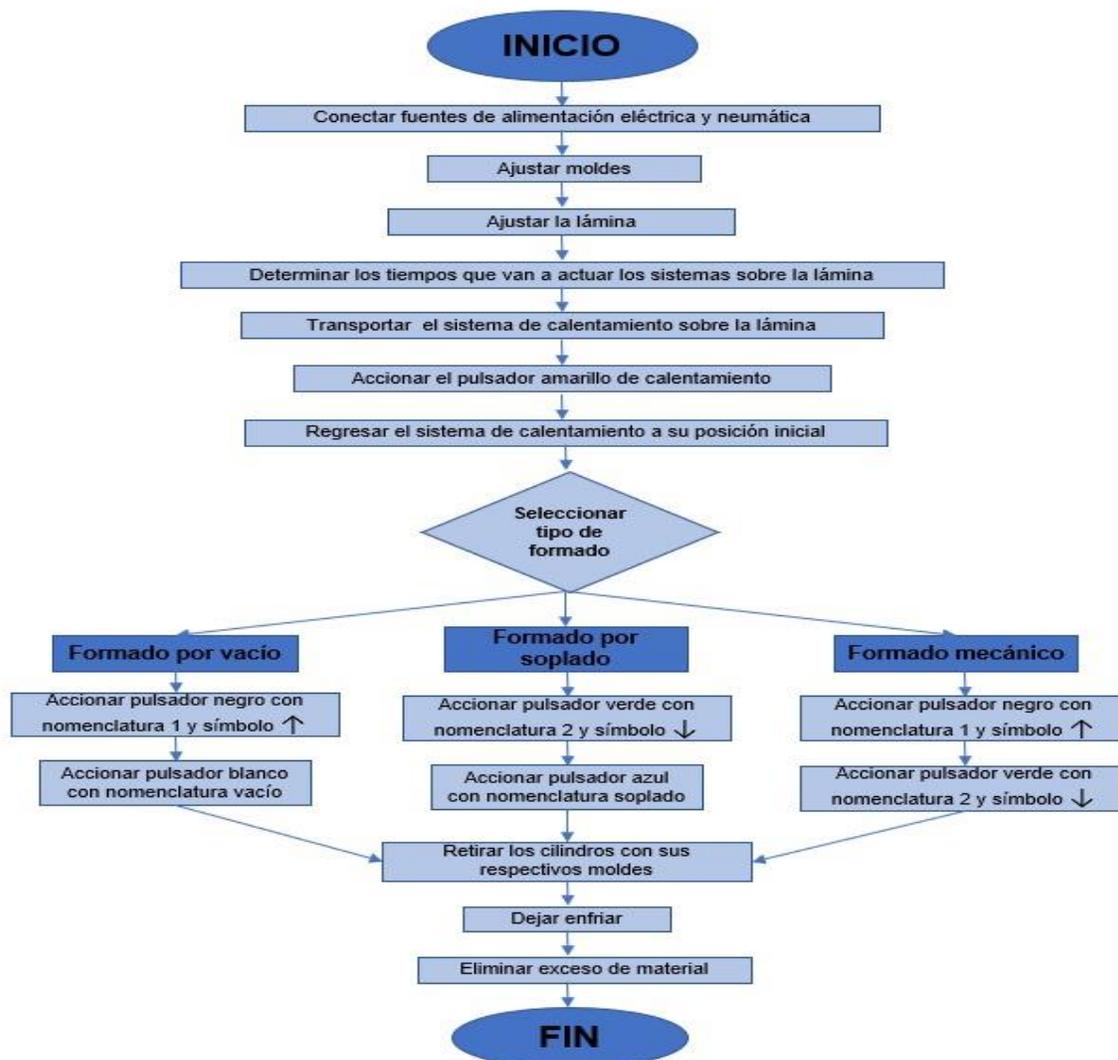
Nota. Plano de instrumentos que conforman el sistema de control de la máquina de termoformado multifuncional. Tomado de: Edraw Max, Wondershare,2020.

5.1.3 Instrucciones de uso

La termoformadora multifuncional didáctica se divide en tres principales sistemas los cuales son: sistema de soplado, sistema de vacío y sistema de calentamiento que fueron diseñados para manipular por estudiantes con bases sólidas en procesos industriales y operación de máquinas y herramientas que fueron adquiridas en semestres cursados a lo largo de la carrera de ingeniería mecánica; sin embargo, el uso de la máquina es semi automático lo cual facilita su manejo, pero se debe tener en cuenta el correcto procedimiento de operación que se explica a continuación:

Figura 45.

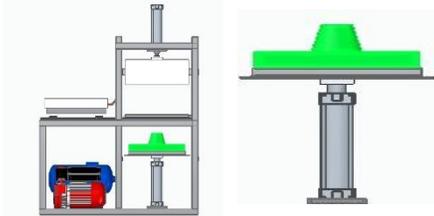
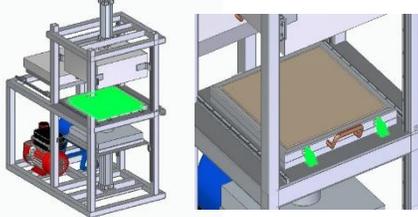
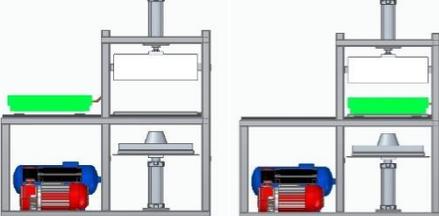
Diagrama de flujo del proceso de termoformado multifuncional.

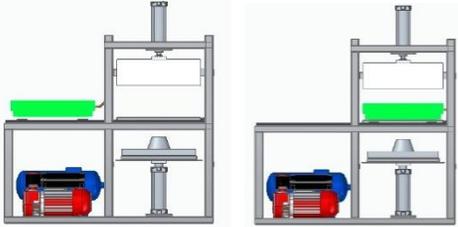
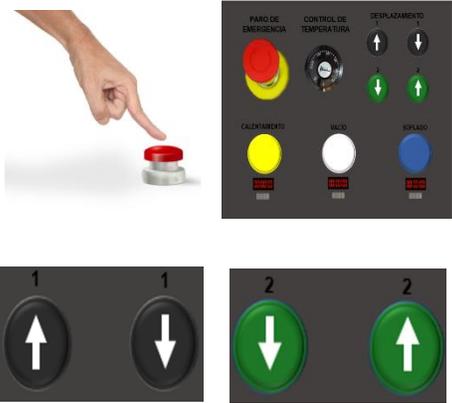
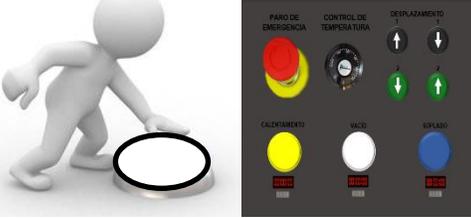


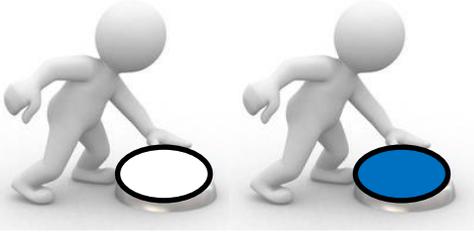
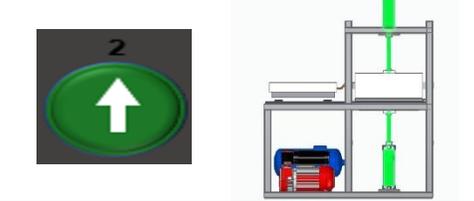
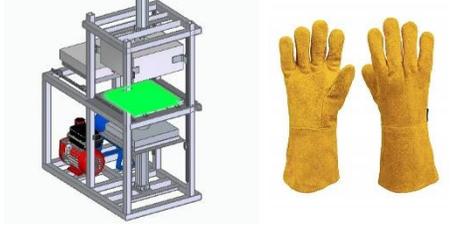
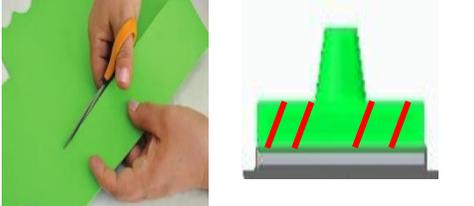
Nota. Diagrama de flujo de las etapas del proceso de termoformado multifuncional.

Tabla 31.

Instrucciones de uso de la máquina de termoformado multifuncional.

Paso a paso	Ilustración
<p>1. Conecte el sistema de calentamiento a una fuente de alimentación de 220V, sistema de vacío a 115V y líneas neumáticas de aire comprimido a los acoples rápidos de 1/4".</p>	
<p>2. Determine la carrera del cilindro que desplaza el sistema de soplado y el molde macho de acuerdo al tipo de molde instalado en la mesa de vacío.</p>	
<p>3. Ubique y ajuste los moldes que requiera utilizar con ayuda de un destornillador en las cuatro esquinas de la plataforma de vacío y si lo requiere la de soplado.</p>	
<p>4. Ubique y ajuste la lámina semielaborada de polímero sobre la estructura de sujeción por medio de los sujetadores rápidos.</p>	
<p>5. Determine el tiempo de calentamiento en que las resistencias eléctricas de cuarzo, la bomba de vacío y el sistema de soplado van actuar sobre la lámina de polímero, mediante los controladores de cada temporizador digital.</p>	
<p>6. Transporte el sistema de calentamiento sobre la lámina a través de los rieles y active el pulsador amarillo.</p>	

<p>7. El sistema de calentamiento se apagará automáticamente cuando transcurra la cantidad de tiempo especificada para cada polímero.</p>	
<p>8. Regrese el sistema de calentamiento a su posición inicial, en cuanto el temporizador digital del sistema de calentamiento indique 000.</p>	
<p>9. De acuerdo al formado que desee realizar, accione los pulsadora que se indican a continuación para desplazar los cilindros: Pulsador negro con nomenclatura 1 y símbolo ↑ para accionar el cilindro que desplaza el conjunto de la mesa de vacío con su respectivo molde. Pulsador verde con nomenclatura 2 y símbolo ↓ para accionar el cilindro que desplaza el conjunto de sistema de soplado con su respectivo molde. Pulsador negro con nomenclatura 1 y símbolo ↑ y pulsador verde con nomenclatura 2 y símbolo ↓ para transportar ambos cilindros y generar formado mecánico.</p>	
<p>10. Para el caso de formado por vacío, accione el pulsador blanco con nomenclatura VACÍO para generar vacío sobre la pieza durante el tiempo especificado en el temporizador digital.</p>	
<p>11. En el caso de formado por soplado accione el pulsador azul con nomenclatura SOPLADO para generar presión positiva sobre la pieza durante el tiempo especificado en el temporizador digital.</p>	

<p>12. Si desea realizar formado mecánico se recomienda combinar las dos técnicas para obtener un mejor acabado por lo cual debe accionar los dos pulsadores mencionados con anterioridad y esperar el tiempo especificado en cada temporizador digital.</p>	
<p>13. En el caso del molde mecánico y por soplado retire la plataforma con el molde superior (macho) a través de los cilindros neumáticos accionando el pulsador verde con nomenclatura 2 y simbología ↑.</p>	
<p>14. Retire la lámina de polímero formada haciendo uso de guantes de carnaza.</p>	
<p>15. Regrese la mesa de vacío accionando el pulsador negro con nomenclatura 1 y simbología ↓.</p>	
<p>16. Elimine el exceso de material.</p>	

Nota. Paso a paso del correcto uso de la máquina de termoformado multifuncional.

5.1.4 Características técnicas

Tabla 32.

Características técnicas de la máquina de termoformado multifuncional.

Característica		Descripción
Medidas	Alto	1,77 m
	Largo	1,2 m
	Ancho	0,7 m
Fuente de alimentación	Calentador	220 V/ 60 Hz
	Bomba de vacío	115 V/60 Hz
Resistencias		Elementos calefactores en cuarzo. Estructura en aluminio-acero inoxidable. Aislamiento térmico manta térmica. Temperatura de operación de 300°C.
Bomba de vacío Robinair Ref 15800		Capacidad de desplazamiento 8 CFM. Conexiones de 1/4" MFL y 3/8" MFL. Motor de 1 hp.
Sistema de compresión		Presión mínima de trabajo 60 psi. Presión máxima de trabajo 120 psi. Conexiones de 1/4".

Nota. Características técnicas de los elementos que conforman la máquina de termoformado multifuncional.

5.2 Mantenimiento de la termoformadora multifuncional

El programa de mantenimiento general se estableció con la finalidad de alargar la vida útil de la máquina, prevenir fallas que pueden incurrir en paradas o funcionamiento inadecuado, mantener la seguridad y brindar confianza al operario; por lo cual está enfocado netamente al mantenimiento preventivo del total de la termoformadora multifuncional y correctivo de piezas específicas de menor complejidad.

En la diversidad de sistemas que conforman la máquina de termoformado multifuncional; requieren de intervenciones preventivas generales, que no son propias de cada sistema, pero se deben incluir como una actividad adicional en cada propuesta de mantenimiento y es la siguiente:

- ✓ Realizar inspección visual y limpieza general antes de cada uso en búsqueda de alguna anomalía presente en los sistemas haciendo uso del formato de check list.

Tabla 33.

Check list termoformadora.

Check list termoformadora					
Responsable				Fecha	
Inspección	Si	No	Descripción de la evidencia		
¿Presenta grietas o fisuras en los sistemas?					
¿Escucha ruidos anormales?					
¿Observa presencia de corrosión?					
¿Siente olores extraños?					
¿Observa des ajuste en las piezas?					
¿Presenta algún tipo de fuga?					

Nota. Documento check list obligatorio antes de cada uso.

5.2.1 Bomba de vacío Robinair Ref 15800

Figura 46.

Bomba de vacío Robinair.



Nota. Imagen de bomba de vacío Robinair Disponible en: [https://www.viaindustrial.com/catalogos_pdf/Bomba de Vacio 15800 ROBINAIR Catalogo_Ingles.pdf](https://www.viaindustrial.com/catalogos_pdf/Bomba_de_Vacio_15800_ROBINAIR_Catalogo_Ingles.pdf)

- ✓ Antes de cada uso verifique el nivel de aceite.
- ✓ Realice cambio de aceite entre 3-6 meses para aceites minerales o 6-12 meses para aceites sintéticos; la velocidad de degradación del aceite es proporcional a su uso, en caso de notar cambio de tonalidad por medio de la mirilla sustitúyalo de inmediato la capacidad estándar de aceite son 18,6 oz.
- ✓ Una vez le añada el aceite encienda la bomba durante 1 minuto y verifique por medio del vidrio visor que la medida de nivel coincida con la especificada por el fabricante.
- ✓ Ajuste periódicamente los tornillos de sujeción de la bomba a la estructura.
- ✓ Verifique el voltaje que entrega la bomba de vacío si es menor al especificado puede presentar problemas eléctricos lo cual se recomienda realizar intervención por expertos.
- ✓ Limpie la bomba únicamente con jabón y agua. No utilice limpiadores comerciales que contengan agentes desengrasantes (recomendación del fabricante).

- ✓ En el caso de presentar fugas de aire, verifique las conexiones (manómetro, acoples y manguera) con la bomba apagada. de ser necesario realice el cambio de estas si la falla continua se recomienda ser intervenida por expertos.
- ✓ Si la bomba presenta un paro inesperado o presenta alguna anomalía de las que fueron descritas con anterioridad remita el equipo a intervención por expertos.

5.2.2 Tanque de almacenamiento Big Red T88007 Torin

Figura 47.

Tanque de almacenamiento Big Red.



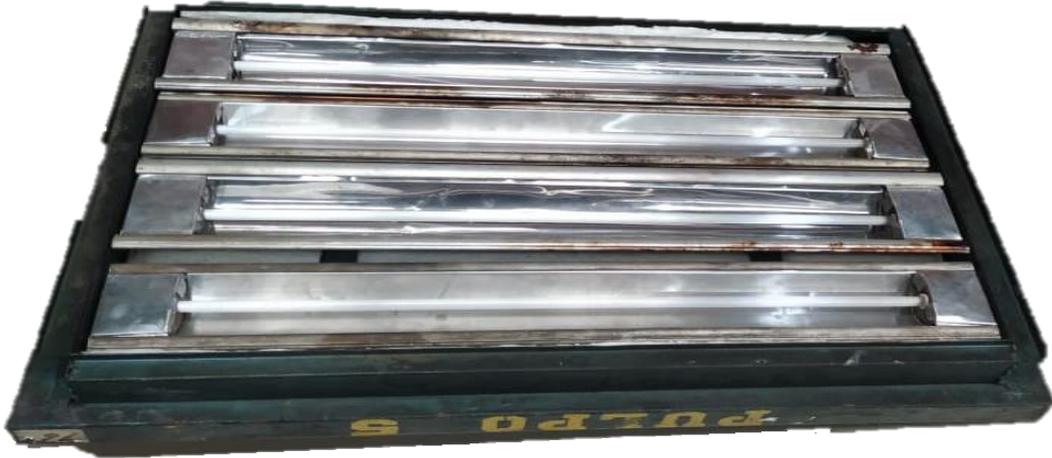
Nota. Imagen tanque de almacenamiento Big Red. Disponible en <https://n9.cl/t7400>

- ✓ Verifique periódicamente que el manómetro este en el rango de operación, si el valor es mayor apague el sistema de inmediato y déjelo en manos de expertos, en caso de ser menor el valor compruebe si presenta algún tipo de fuga.
- ✓ En el caso de presentar fugas de aire, verifique las conexiones (acoples y manguera) con la bomba apagada. de ser necesario realice el cambio de estas si la falla continua se recomienda ser intervenida por expertos.
- ✓ Verifique el estado de las válvulas cerrándolas y observando que el nivel de aire almacenado aumente.

5.2.3 Sistema de calentamiento

Figura 48.

Resistencia eléctricas en cuarzo.



Nota. Imagen de resistencia eléctrica en cuarzo de la empresa Electro Sylvania suministrada por el proveedor a través de cotización.

- ✓ El sistema de calentamiento incluye guías de movimiento lineal SSR 15-20 de la marca THK las cuales requieren ser lubricadas en los bloques de movimiento lineal con grasa N.º 2 a base de jabón de litio cada 100 km de recorrido o entre 6 y 12 meses o si prefiere aceite para guías de deslizamiento con viscosidad dinámica: aproximadamente de 68 cst para que sea especialmente resistente a la emulsificación (recomendación del fabricante).
- ✓ Realizar inspección del total de las superficies en busca acumulación de cualquier tipo de sustancia antes de cada uso.
- ✓ Realizar semestralmente lectura de temperatura de operación con equipos termográficos.

5.2.4 Cilindros neumáticos

Figura 49.

Cilindro neumático de doble efecto.



Nota. Cilindro neumático de doble efecto de la empresa Festo. Disponible en: <https://n9.cl/16mhx>

- ✓ El mantenimiento del sistema neumático interno deberá ser realizado únicamente por personal calificado.
- ✓ Compruebe periódicamente la superficie del vástago, las juntas y la camisa del cilindro; cualquier daño o corrosión que aparezca en estos componentes podría aumentar la fricción y dar lugar a condiciones peligrosas por lo que el fabricante recomienda sustituir el actuador.
- ✓ Retire cualquier tipo de material que pueda formar depósitos en la superficie externa del actuador y del soporte de montaje.
- ✓ Revise periódicamente el actuador para evidenciar la presencia de lubricación.

5.3 Guías de laboratorio

Se realizaron guías de laboratorio para cada método de formado que la máquina de termoformado multifuncional permite desarrollar dentro del formato y la estructura que la Fundación Universidad de América maneja dentro de sus laboratorios; comenzando por el proceso más básico y antiguo, que es el formado por vacío; seguido del formado por soplado que surge de la necesidad de realizar piezas en grandes masas y por último el formado mecánico que debido a la permisibilidad de combinación de los tres procesos se pueden obtener geometrías de mayor grado de complejidad; en el avance de las guías de laboratorio los procesos de formado permitirán adquirir competencias y destrezas mediante la manipulación directa de la máquina, en las áreas de transferencia de calor, neumática y procesos de manufactura de polímeros, que brindaran un apoyo al docente y afianzamiento de la teoría dentro de la práctica. Estas guías se pueden encontrar en los **Anexos 1-2-3**.

6. ANALIZAR FINANCIERAMENTE LA VIABILIDAD DEL PROYECTO

Dentro del proyecto de la termoformadora multifuncional con enfoque didáctico dirigido a los estudiantes de ingeniería mecánica y carreras a fin de la Fundación Universidad de América, se desarrolló un análisis de costo de materia prima, elementos y sistemas que conforman la máquina, donde cuyo principal objetivo es evidenciar la viabilidad en la implementación de la máquina de termoformado como recurso y apoyo didáctico en los laboratorios, especialmente para contextualizar y llevar a la práctica la asignatura de procesos II.

Es por eso que dicho análisis comienza con la segmentación de costos por categorías de sistemas y subsistemas que hacen parte de la termoformadora multifuncional.

6.1 Costo de materia prima estructural, máquinas y elementos obtenidos por catálogo

Estos costos están sujetos a cambios debido a que los valores comerciales que se presentan fueron obtenidos a partir de comercializadores locales en los departamentos de Cundinamarca y Casanare; cotizaciones de presupuesto con conservación por un lapso no mayor a 30 días y catálogos online que pueden presentar una variación de acuerdo a factores económicos de la región.

Tabla 34.*Costos de materia prima estructural.*

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Perfil tubular cuadrado de 1 1/2" x 1 1/2" x 2 mm de espesor	m	20	\$ 20.633	\$ 412.660
Lámina de acero A500 1m x 1 m con espesor de 6 mm	m	1	\$ 635.850	\$ 635.850
Ángulo de L3x38 x 6mm de espesor x 3m de longitud	m	1	\$ 57.100	\$ 57.100
Tornillo M8 x 40 mm	Und	16	\$ 2.800	\$ 44.800
Tornillo cabeza avellanada plana M4	Und	8	\$ 400	\$ 3.200
Tuerca y arandela M8	Und	16	\$ 500	\$ 8.000
Bisagra cabeza redonda 2"	Und	2	\$ 4.800	\$ 9.600
Lámina de aluminio 50cmx50cm x 10mm	Und	3	\$ 322.500	\$ 967.500
			Total	\$2.138.710

Nota. Costos de materia prima requerida para diversos sistemas que conforman la máquina de termoformado.

Tabla 35.*Costos de sistema de calentamiento.*

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Conjunto de resistencias eléctricas en cuarzo con carcasa y aislamiento térmico electro Silvania.	Und	1	\$ 3.510.500	\$ 3.510.500
			Total	\$ 3.510.500

Nota. El sistema de calentamiento cuenta con todos los elementos necesarios para su óptimo funcionamiento.

Tabla 36.*Costos de sistema de vacío.*

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Bomba de vacío Robinair Ref 15800 de 8 Cfm.	Und	1	\$ 3.209.549	\$ 3.209.549
Manguera neumática Ciede de 1/4" Ref RP0406.	m	1	\$ 5.117	\$ 5.117
Acople rápido neumático de 1/4" hembra.	Und	4	\$ 12.500	\$ 50.000
Válvula antirretorno SERIE VNR 1/4	Und	2	\$ 37.870	\$ 75.740
Tanque de almacenamiento Torin Ref.T88007	Und	1	\$ 478.300	\$ 478.300
Lámina de madera roble 50x50cm x 5cm de espesor	Und	1	\$ 45.000	\$ 45.000
			Total	\$ 3.863.706

Nota. Costos equivalentes al sistema de vacío de la máquina de termoformado multifuncional.

Tabla 37.*Costos de sistema de soplado.*

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Acople rápido macho neumático de 1/4".	Und	2	\$ 13.500	\$ 27.000
Manguera neumática Ciede de 1/4" Ref RP0406.	m	4	\$ 5.117	\$ 20.468
Boquilla exair en bronce	Und	1	\$ 174.454	\$ 174.454
Boquilla de soplado UEA D020 en aluminio.	Und	1	\$ 28.550	\$ 28.550
			Total	\$ 250.472

Nota. Los costos del sistema de soplado se ven reducidos notablemente debido a que la los laboratorios de la Fundación Universidad de América cuentan con líneas de aire comprimido que son aprovechables en este proyecto.

Tabla 38.*Costos de sistema de desplazamiento.*

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Guía de movimiento lineal SSR 15-20 marca THK con rodamiento.	Und	12	\$ 95.680	\$1.148.160
Cilindro compacto Ref ADN-32 Festo.	Und	1	\$ 271.799	\$ 271.799
Cilindro compacto Ref ADN-40 Festo.	Und	1	\$ 359.395	\$ 359.395
Cerrojo oscilante	Und	2	\$ 32.000	\$ 64.000
			Total	\$1.843.354

Nota. Costos de unidades de desplazamiento que aseguran la correcta ubicación de todos los sistemas.

Tabla 39.*Costos de instrumentación.*

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Pulsador 22mm Ref. Xb4ba42 Schneider	Und	7	\$ 48.000	\$ 336.000
Cableado 24 Awg 1007 x 50 m	Und	1	\$ 78.995	\$ 78.995
Temporizador digital multifunción.	Und	3	\$ 214.900	\$ 644.700
Paro de emergencia 22mm Ref Xb4bs8442 Schneider	Und	1	\$ 80.000	\$ 80.000
Relé de 4 contactores 24V	Und	4	\$ 12.000	\$ 48.000
Válvula reguladora de flujo Lsa	Und	4	\$ 9.684	\$ 38.736
Fuente de alimentación 24 V	Und	1	\$ 70.000	\$ 70.000
Electro válvula 3/2 Bsp 1/4 con solenoide	Und	2	\$ 120.000	\$ 240.000
Electro válvula 5/3 Bsp 1/4 con solenoide	Und	2	\$ 273.990	\$ 547.980
			Total	\$2.084.411

Nota. Costos de panel de control con sus respectivos elementos de instrumentación.

6.2 Costos de talento humano y mano de obra

Dentro de esta valoración numérica se contempla el nivel de formación de cada persona aportante al proyecto, junto con la valoración por trabajo, lo que significa que se emplea un valor por unidad de hora, además que dicho presupuesto incluye gastos que son

necesarios para el desarrollo de la propuesta y de darse su fabricación en igual proporción, dichos valores están inmersos en el uso, desgaste y materiales requeridos para el óptimo desarrollo del proyecto tanto administrativo como metalmecánico.

Tabla 40.

Costos de talento humano.

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Diseñador	Hora	1600	\$ 5.000	\$ 8.000.000
Orientador	Hora	32	\$ 30.000	\$ 960.000
			Total	\$ 8.960.000

Nota. Costos de talento humano en el desarrollo de la propuesta de diseño.

Tabla 41.

Costos de mano de obra.

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Soldador	Hora	16	\$ 28.000	\$ 448.000
Auxiliar de soldadura	Hora	16	\$ 7.500	\$ 120.000
Técnico electromecánico	Hora	8	\$ 12.500	\$ 100.000
			Total	\$ 668.000

Nota. Los costos de mano de obra incluyen materia prima como soldadura 7018, masilla vehicular 3 en 1 y desgaste y uso de herramientas propias de los contratados.

6.3 Costo final del diseño de la termoformadora multifuncional

El costo incluye todos los gastos necesarios para el desarrollo y fabricación de la máquina de termoformado multifuncional.

Tabla 42.*Costo final del proyecto de la termoformadora multifuncional.*

Descripción	Valor
Sistema estructural	\$ 2.138.710
Sistema de calentamiento	\$ 3.510.500
Sistema de vacío	\$ 3.863.706
Sistema de soplado	\$ 250.472
Sistema de desplazamiento	\$ 1.843.354
Sistema de instrumentación	\$ 2.084.411
Programa administrativo	\$ 8.960.000
Programa operacional	\$ 668.000
Total	\$ 23.949.153

Nota. Costos equivalentes al desarrollo de la propuesta y fabricación de la máquina de termoformado multifuncional.

6.4 Costo de venta

El costo final de venta comercial puede reducirse, ya que los costos que se incluyeron, son costos comerciales por pieza o unidad; que de requerir la fabricación de más termoformadoras, los precios al por mayor o precios que manejan directamente los fabricantes que solicitan unidad mínima de pedido, permitirán obtener un mejor precio de mercadeo.

Tabla 43.*Costo final de venta comercial.*

Descripción	Valor
Sistema estructural	\$ 2.138.710
Sistema de calentamiento	\$ 3.510.500
Sistema de vacío	\$ 3.863.706
Sistema de soplado	\$ 250.472
Sistema de desplazamiento	\$ 1.843.354
Sistema de instrumentación	\$ 1.303.211
Programa operacional	\$ 668.000
Total	\$ 14.359.153

Nota. Costo final de venta comercial de la termoformadora multifuncional didáctica.

6.5 Comparativa comercial

A través de cotizaciones ver **anexos 4-5-6** de fabricantes e importadores de máquinas de termoformado, que presentan características similares a la propuesta de máquina de termoformado multifuncional e incluso una con características más industriales se comparan de manera descriptiva y monetaria para evidenciar la viabilidad que tiene la propuesta de proyecto.

Tabla 44.

Costos comerciales de termoformadoras.

Descripción	Valor
Termoformadora multifuncional didáctica	\$ 14.359.153
Máquina para termoformado neumática; Termoformados Osorno	\$ 9.500.000
Termoformadora Universal maquinaria y guillotinas S.A.S	\$ 14.500.000
Termoformadora VTF Verpacken	\$ 46.000.000

Nota. Costos de termoformadoras obtenidos a través de cotizaciones.

Se obtiene que el costo final de comercialización de la propuesta de termoformado multifuncional didáctica, se encuentra dentro del rango de valores comerciales que en la actualidad la industria colombiana distribuye en el mercado.

Sin embargo, la propuesta de termoformado multifuncional presenta ventajas frente a sus competidores directos ya que, además de generar formado por vacío, cuenta con dos opciones más para formar el polímero, y es el formado por soplado y mecánico que pueden abarcar mayor número de geometrías que representen un grado superior de complejidad; pero también su uso está enfocado a la parte didáctica donde su nivel de producción es mayormente reducido; al igual que algunos de los materiales en los que estaría construida.

7. CONCLUSIONES

La interacción entre estudiante y máquina puede lograr un impacto positivo en la ampliación de competencias, a través de la ejecución de las guías de laboratorio y la correcta obtención de los cálculos necesarios durante su desarrollo, abarcando temática de transferencia de calor específicamente por radiación y conducción; neumática e instrumentación; por medio de los elementos que conforman cada sistema; que finalmente repercuten en la destacada contextualización de procesos de manufactura directamente en la transformación de polímeros a través de los tres métodos de termoformado.

Al identificar los parámetros y requerimientos tanto del proceso como de la máquina de termoformado, permite establecer acertados criterios de diseño, para una adecuada proposición de sistemas en las alternativas.

Como resultado de la búsqueda de alternativas en los sistemas que conforman la máquina, se evidencia gran diversidad de sistemas y subsistemas que pueden realizar funciones similares; es decir cumplen con la finalidad del proceso de termoformado, pero con menor producción y calidad en las piezas, además de incurrir en costos de funcionamiento e instalación.

En consecuencia, de la elección de un perfil con mayor dimensión de lo requerido, se obtiene que este brinda un mayor factor de seguridad de la estructura de la máquina, además de facilitar la fijación y distribución de los elementos, con poca diferencia en su costo.

Para realizar un buen proceso de termoformado, es necesario que el vacío que se aplica a las geometrías se realice en un corto lapso de tiempo, lo cual una bomba de vacío convencional no logra y aquellas que lo permiten tienen un alto costo en el mercado; por ende, se hace uso de un tanque de almacenamiento que suple esta necesidad.

Debido a las propiedades de los termoplásticos y a los alcances de la propuesta de diseño de la máquina; se concluye que a pesar de las limitaciones de los plásticos con los que opera, esta puede realizar su proceso con mayor variedad de polímeros termoplásticos y diferentes espesores.

Conforme al manual instructivo, de mantenimiento, guías de laboratorio y proceso de diseño, se logra denotar que para poder evidenciar las fases del proceso de termoformado y de su funcionamiento, se recomienda que la máquina realice la operación de los sistemas que la conforman etapa por etapa.

Finalmente se deduce que la propuesta de máquina de termoformado multifuncional cumple con los criterios y parámetros con los cuales fue diseñada, brindando apoyo a los docentes y transmitiendo conocimientos mediante el desarrollo de su utilización, a través de un precio razonable lo cual representa que la propuesta de diseño es viable.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Plastiglas de Mexico S.A de C.V, *Manual Técnico termoformado*, México, 2012.
- [2] Universidad Autónoma de Manizales, «Mejoran máquina para moldear plásticos en la Universidad Autónoma de Manizales,» *La patria*, p. 1, 2020.
- [3] J. E. J. Delgado, *Recuperación funcional del equipo thermoforming center 911 del laboratorio de procesos de la Universidad Autónoma del Caribe*, Tesis pre, Barranquilla: Universidad Autónoma del Caribe, 2012.
- [4] D. F. D.F. Cárdenas, *Calculo, diseño y simulación de máquina termoformadora para el laboratorio de materiales de ingeniería de la Universidad los Libertadores*, Tesis pre, Bogotá: Universidad los Libertadores, 2013.
- [5] M. M. A.J. Cabrera, *Diseño de una máquina de termoformado para laboratorio*, Tesis pre, Guayaquil-Ecuador: Escuela Superior Politécnica del litoral, 2017.
- [6] J. C.-. F. Salazar, *Diseño y construcción de una máquina termoformadora de plásticos con control automático para la empresa Miviltech Soluciones Industriales S.A*, Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas, 2015.
- [7] F. L. Carrasquero, «Fundamentos de Polímeros,» Edición 2005, Mérida Venezuela, 2005.
- [8] Mariano, «Tecnología de los plásticos,» 30 Mayo 2011. [En línea]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/termoformado.html> . [Último acceso: 23 Marzo 2021].
- [9] D. F. Betancourt, «Cómo hacer una matriz de priorización,» 24 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.ingenioempresa.com/matriz-de-priorizacion/>. [Último acceso: 15 Marzo 2021].
- [10] Fundación Universidad de América, «Modificaciones Matriz de Leopold,» *Evaluación de impacto ambiental matrices simples e interactivas departamento de ambiental*, pp. 3-5, 1971.
- [11] Goodfellow, «Información sobre materiales,» Londres, 2008.
- [12] Multifab Incorporated, «Thermoforming Design Guidelines,» *Multifab inc*, pp. 14-15, 2009.
- [13] Ss Covadonga, «Catálogo general de señales de seguridad,» Madrid, 2018.
- [14] Cnc Repowering S.A.S, «Temporizador digital multifunción,» Medellín, 2019.

ANEXOS

ANEXO 1

GUÍA DE LABORATORIO PARA EL PROCESO DE FORMADO POR VACÍO

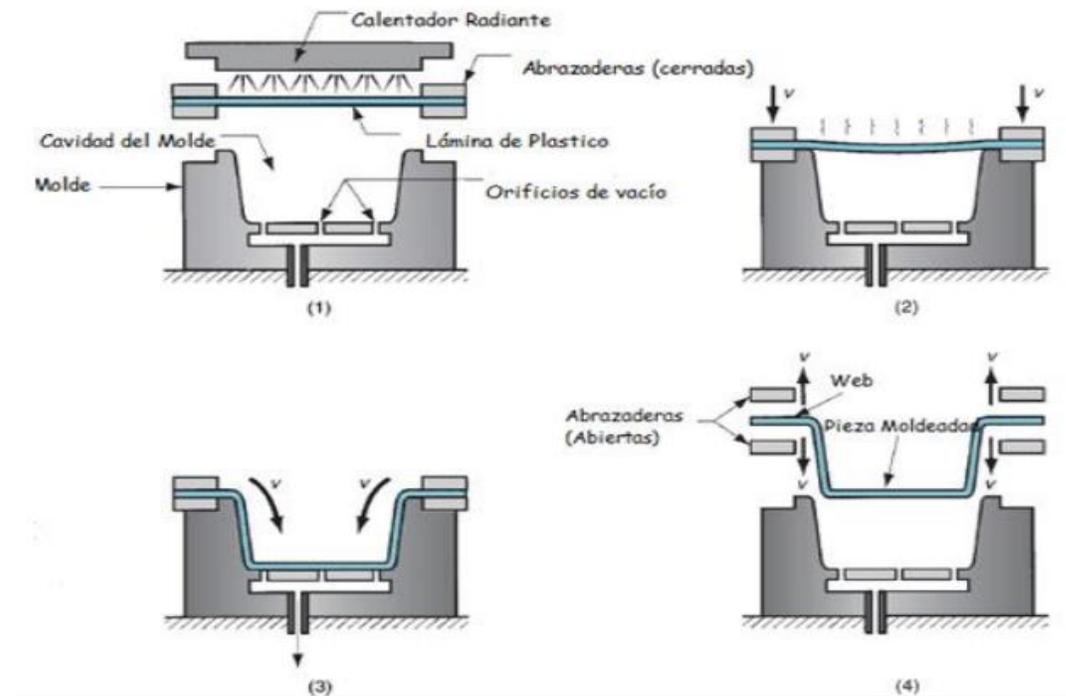
		UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	
PROGRAMAS: INGENIERÍA MECÁNICA		FACULTAD: INGENIERÍAS	
NOMBRE ASIGNATURA: PROCESOS II		CODIGO: 3460L	
PRÁCTICA No. 1	NOMBRE DE LA PRÁCTICA: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE TERMOFORMADO POR VACÍO		

1	INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO:
INTRODUCCIÓN Desde principios del siglo XX se han conocido algunas técnicas del formado de láminas, con materiales como el metal, vidrio y fibras naturales. Los verdaderos principios del termoformado se dieron con el desarrollo de los materiales termoplásticos, lo cual fue durante la segunda Guerra Mundial. Los años de postguerra trajeron los grandes volúmenes de comercialización y el rápido desarrollo de equipos y maquinaria capaces de adaptarse a los métodos modernos de manufactura, para producir productos más útiles y más rentables dando así el comienzo de la técnica de formado por vacío, siendo el método más antiguo para formar una hoja de plástico en una pieza utilitaria. Este proceso de termoformado consiste en tomar una lámina de polímero semielaborada que ha sido previamente calentada por algún medio de transferencia de calor, hasta que alcance el punto de estar reblandecida; continuando su proceso se sitúa encima de un molde sellado con la geometría que se quiere obtener y se sujeta	

para que el aire atrapado pueda ser evacuado por la presión de vacío lo que ocasionará que la lámina adquiera la forma del molde como se muestra a continuación.

Figura 1.

Formado al vacío.



Nota. Se observan las etapas del proceso de formado con ayuda de presión negativa (vacío) Tomado de: Artículo, Diseño y construcción de una máquina termoformadora de plástico con control automático para la empresa Miviltech soluciones industriales s.a. [En línea] Disponible en <https://n9.cl/nl319>

En la actualidad se utiliza como materia prima laminas semielaboradas que se pueden obtener a través del proceso de extrusión e inyección, dichas laminas están compuestas por polímeros termoplásticos que se consiguen de fuentes naturales, derivados del petróleo y por síntesis en laboratorio.

2 OBJETIVO(S):

- ✓ Conocer el proceso de formado por vacío.
- ✓ Practicar la técnica de formado por vacío.

3 EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y/O MATERIALES:

Por cada grupo de 4 personas:

Laminas semielaboradas de poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC) y poliéster (PET)

- Check list de termoformadora.
- Termómetro infrarrojo láser con sensor de temperatura.
- Molde o geometría para formado en vacío.
- Tijeras de corte de plástico.
- Destornillador de estrella.
- Guantes de protección de alta temperatura.
- Termoformadora multifuncional.
- Micrómetro.
- Regla.

4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS:

Previo a la práctica el estudiante debe realizar el procedimiento en forma de diagrama de flujo; y antes de efectuar cualquier tipo de procedimiento verifique los siguientes cálculos y tenga en cuenta las recomendaciones.

Ecuación 1.

Relación de estirado del polímero con respecto al molde.

$$R_{\text{estirado}} = \frac{2(LH) + 2(WH) + (WH)}{(LW)}$$

Donde a modo de ilustración se muestran las cotas con nomenclatura para remplazar en la formula.

exactitud la función que cumple cada elemento y que se debe tener en cuenta en el desarrollo del procedimiento.

Tabla 1.

Descripción de panel de control.

Símbolo	Descripción
	<p>Hace referencia al paro de emergencia, encargado de cortar cualquier tipo de acción que se esté generando durante el proceso de formado cuya finalidad es evitar graves accidentes.</p>
	<p>Temporizador digital, encargado de mostrar el conteo y cantidad de tiempo que actúa cada sistema sobre la lámina; se ubica bajo cada pulsador.</p>
	<p>Controlador de temporizador digital; permite aumentar, disminuir la cantidad de tiempo que cada sistema actúa sobre la lámina.</p>
	<p>Pulsador con coloración amarilla; encargado de encender el sistema de calentamiento para deformar la lámina de polímero.</p>
	<p>Pulsador con coloración blanca; encargado de encender el sistema de vacío para evacuar el aire que se almacena entre el molde y la lámina.</p>
	<p>Pulsador con coloración azul; encargado de encender el sistema de soplado para forzar al polímero a tomar la forma del molde a través de presión positiva.</p>
	<p>Pulsador con coloración negra y flecha apuntando al norte; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°1 que desplaza el conjunto de vacío hacia arriba.</p>

	<p>Pulsador con coloración negra y flecha apuntando al sur; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°1 que desplaza el conjunto de vacío hacia abajo.</p>
	<p>Pulsador con coloración verde y flecha apuntando al sur; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°2 que desplaza el conjunto de soplado hacia abajo.</p>
	<p>Pulsador con coloración verde y flecha apuntando al norte; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°2 que desplaza el conjunto de soplado hacia arriba.</p>

Nota. Descripción de elementos de instrumentación que controlan los sistemas que conforman la máquina de termoformado.

Figura 3.



Panel de control de máquina de termoformado.

Nota. Panel del control completo de la máquina de termoformado multifuncional.

La obtención de los cálculos anteriores comprueba que las dimensiones del molde no superan el límite permitido para causar un sobre estiramiento.

RECOMENDACIONES

- Tenga en cuenta las propiedades y características que influyen en correcto desarrollo del proceso de formado por vacío.

Tabla 2.

Propiedades de los polímeros a utilizar en el proceso de formado.

Material	Poliestireno (PS)	Cloruro de polivinilo (PVC)	Poliéster (PET)
Temperatura de formado (°C)	145-180	160-200	145-175
Espesor lámina (mm)	3		
Tamaño aprovechable de la lámina (cm)	40x40		
Tiempo de vacío recomendado(s).	5		
Tiempo de calentamiento (s)	43	60	47

Nota. Caracterización de los polímeros a temperatura, dimensión y espesor en los cuales opera la máquina de termoformado multifuncional. Tomado de: Trabajo fin de master, Termoformado de geometrías complejas. [En línea] Disponible en <https://n9.cl/3f5g>

- La cantidad de vacío puede variar de acuerdo al tipo de molde que se utilice, se recomiendan 5 segundos para geometrías con pocos detalles y profundidad, en caso de no presentar estas características se debe hallar de forma práctica mediante prueba y ensayo.
- La relación máxima de estiramiento no debe superar el valor de 3.
- No exceda la temperatura de formado de cada polímero.
- El tiempo de calentamiento puede variar de acuerdo al tiempo en el que las resistencias lleguen a la temperatura de operación.

PROCEDIMIENTO.

Luego de realizar los cálculos y contar con la información necesaria ejecute el paso a paso del procedimiento de uso de la máquina de termoformado multifuncional.

1. INSTALACIÓN DE MOLDE

El molde de formado por vacío no requiere del sistema de sujeción que se incluye en la plataforma de vacío por ende solo se ubica el o los moldes sobre el espacio de la plataforma donde prefiera obtener la geometría.

2. SUJECIÓN DE LÁMINA

Verifique que el sistema de calentamiento se encuentre en la parte izquierda de la máquina de termoformado y que no impida el movimiento de la plataforma de sujeción, seguido a esto ubique la lámina semielaborada en medio de la plataforma de sujeción, finalmente asegure que la plataforma este correctamente afianzada sobre los sujetadores rápidos.

3. TIEMPO EN MECANISMOS

Determine el tiempo de calentamiento en que las resistencias eléctricas de cuarzo, la bomba de vacío y el sistema de soplado van actuar sobre la lámina de polímero, mediante los controladores de cada temporizador digital.

4. CALENTAMIENTO DE LÁMINA

Manteniendo la lámina sujeta a la plataforma de sujeción, desplace el sistema de calentamiento sobre ella haciendo uso de sus manos, accione el pulsador amarillo y espere el tiempo especificado para el tipo de polímero que este deformando, finalmente retire el sistema hasta su posición inicial cuando el temporizador digital indique 00:00:00; el sistema de calentamiento se apagará automáticamente cuando transcurra la cantidad de tiempo especificada para cada polímero.

5. FORMADO

Al terminar el desplazamiento del sistema de calentamiento accione el pulsador negro con nomenclatura 1 y símbolo ↑ para accionar el cilindro que desplaza el conjunto de la mesa de vacío con su respectivo molde; cuando finalmente la plataforma llegue al final de su carrera accione el pulsador blanco con nomenclatura **VACÍO** para generar vacío sobre la pieza durante el tiempo especificado en el temporizador digital.

6. ENFRIAMIENTO

Espere unos segundos hasta que la pieza disminuya su temperatura.

7. TERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Cuando la pieza este a temperatura ambiente retire los seguros de la plataforma de sujeción y recorte el material sobrante de la geometría; si desea formar otra geometría accione el pulsador negro con nomenclatura 1 y simbología ↓ para que el cilindro vuelva a su posición inicial y repita el ciclo.

4 CÁLCULOS Y RESULTADOS:

- ✓ Registre paso a paso el procedimiento realizado durante la práctica y sopórtelo con imágenes y fotografías.
- ✓ Complemente y describa cada uno de los materiales, equipos y elementos utilizados en la práctica.
- ✓ Determine el porcentaje de adelgazamiento para cada geometría.
- ✓ Establezca las conclusiones y recomendaciones
- ✓ Registre la bibliografía consultada.

5 REFERENCIAS:

- Plastiglas de México S.A, Manual Técnico termoformado, México, 2012.
- MULTIFAB INCORPORATED , «THERMOFORMING DESIGN GUIDELINES,» *Multifab inc*, pp. 14-15, 2009.

	Elaboró	Revisó	Autorizó
Cargo	Estudiante	Docente	Decanatura o Dirección Ingenierías
Nombre	Juan Sebastián López Rodríguez Edwin Alexander Lozano Buitrago	Ing. OSCAR CHAMARRAVÌ GUERRA	
Firma			

ANEXO 2

GUÍA DE LABORATORIO PARA EL PROCESO DE FORMADO POR SOPLADO.

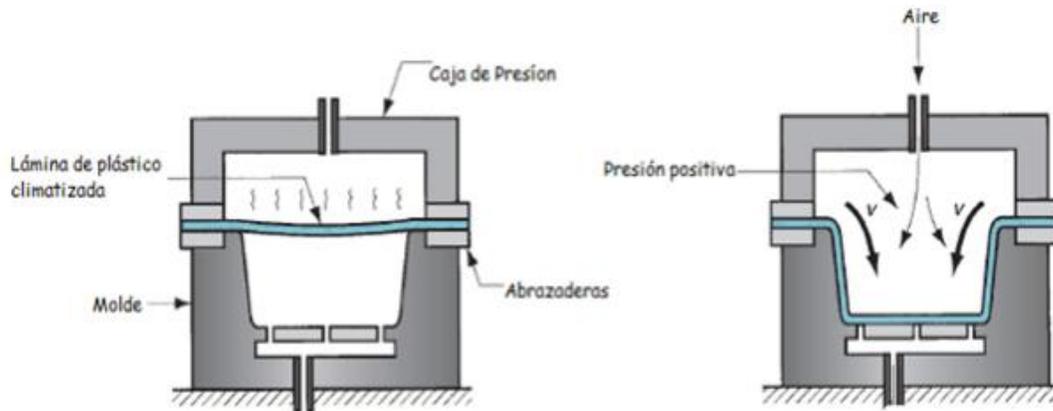
		UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	
PROGRAMAS: INGENIERÍA MECÁNICA		FACULTAD: INGENIERÍAS	
NOMBRE ASIGNATURA: PROCESOS II		CODIGO: 3460L	
PRÁCTICA No. 2	NOMBRE DE LA PRÁCTICA: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE TERMOFORMADO POR SOPLADO		

1	INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO:
INTRODUCCIÓN	
<p>Durante los años cincuenta, los volúmenes de producción de materiales termoplásticos y los productos hechos con ellos alcanzaron cifras impresionantes. La década de los 60's fue una era que instituyó las bases del futuro desarrollando la industria del termoformado. En los 70's, los grandes consumidores y la competencia entre productos, demandaron máquinas de alta velocidad, productividad y diversidad de geometrías. Los productores de equipos satisficieron tales necesidades con máquinas capaces de producir estas cantidades, incluyendo técnicas como el formado por soplado o presión positiva en conjunto con la sofisticación en los controles.</p> <p>Este proceso de termoformado es similar al formado por vacío, la principal diferencia radica en el uso de presiones positivas para ayudar al material polimérico a tomar la forma del molde o geometría; también los moldes utilizados en este método requieren orificios para evacuar el aire de forma progresiva para obtener la forma del molde</p>	

adecuada, en ocasiones las piezas se respaldan con formado por vacío combinando las dos técnicas, su proceso se muestra a continuación.

Figura 1.

Formado por soplado.



Nota. Se observan las etapas del proceso de formado con ayuda de presión positiva. Tomado de: Artículo, Diseño y construcción de una máquina termoformadora de plástico con control automático para la empresa Miviltech soluciones industriales s.a.

[En línea] Disponible en <https://n9.cl/nl319>

2 OBJETIVO(S):

- ✓ Conocer el proceso de formado por soplado.
- ✓ Practicar la técnica de formado por soplado.
- ✓ Combinar el proceso de formado por vacío con soplado.

3 EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y/O MATERIALES:

Por cada grupo de 4 personas:

Laminas semielaboradas de poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC) y poliéster (PET)

- Check list de termoformadora.
- Termómetro infrarrojo láser con sensor de temperatura.
- Molde o geometría para formado en vacío.
- Tijeras de corte de plástico.

- Destornillador de estrella.
- Guantes de protección de alta temperatura.
- Termoformadora multifuncional.
- Micrómetro.
- Regla.

4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS:

Previo a la práctica el estudiante debe realizar el procedimiento en forma de diagrama de flujo; y antes de efectuar cualquier tipo de procedimiento verifique los siguientes cálculos y tenga en cuenta las recomendaciones.

Ecuación 1.

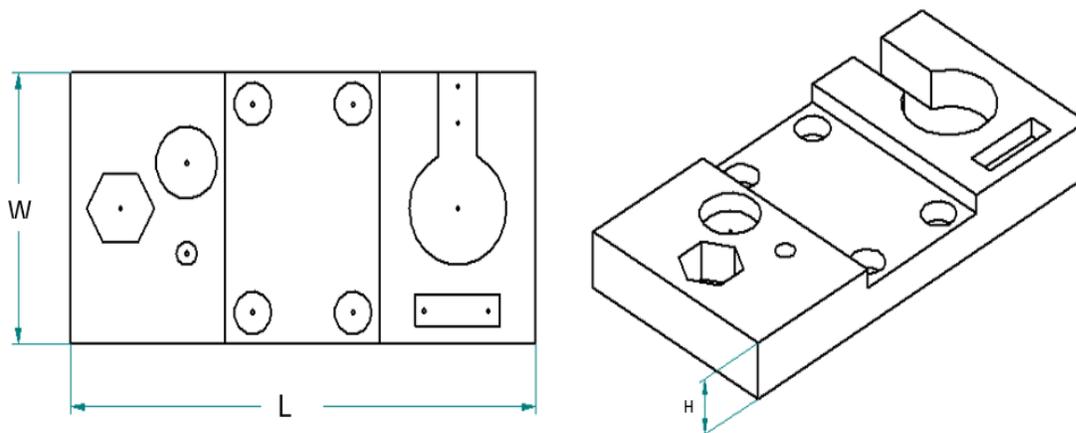
Relación de estirado del polímero con respecto al molde.

$$R_{\text{estirado}} = \frac{2(LH) + 2(WH) + (WH)}{(LW)}$$

Donde a modo de ilustración se muestran las cotas con nomenclatura para remplazar en la fórmula.

Figura 2.

Molde para termoformado.



Nota. La relación de estirado no debe superar el valor máximo de 3, lo que significa que limita las dimensiones de cada tipo de molde.

Ecuación 2.

Espesor mínimo de inicio.

$$\text{Espesor mínimo de inicio} = R_{\text{estirado}} \times \text{Espesor final deseado}$$

Nota. Equivale al valor mínimo de espesor con el cual debe contar la lámina a formar; el espesor final deseado lo establece el operario.

Ecuación 3.

Porcentaje de adelgazamiento.

$$\% \text{ de adelgazamiento} = \frac{\text{Espesor final del material}}{\text{Espesor original del material}}$$

Nota. Porcentaje en el que el espesor de la lámina formada se reduce por causa del estiramiento, se determina con el valor de espesor final deseado y se compara con el valor de espesor obtenido al final de la geometría.

El panel de control de la máquina de termoformado multifuncional, cuenta con simbología básica, que permite identificar la función que cumple cada elemento de instrumentación que hace parte de él, sin embargo, en la tabla se describe con mayor exactitud la función que cumple cada elemento y que se debe tener en cuenta en el desarrollo del procedimiento.

Tabla 1.

Descripción de panel de control.

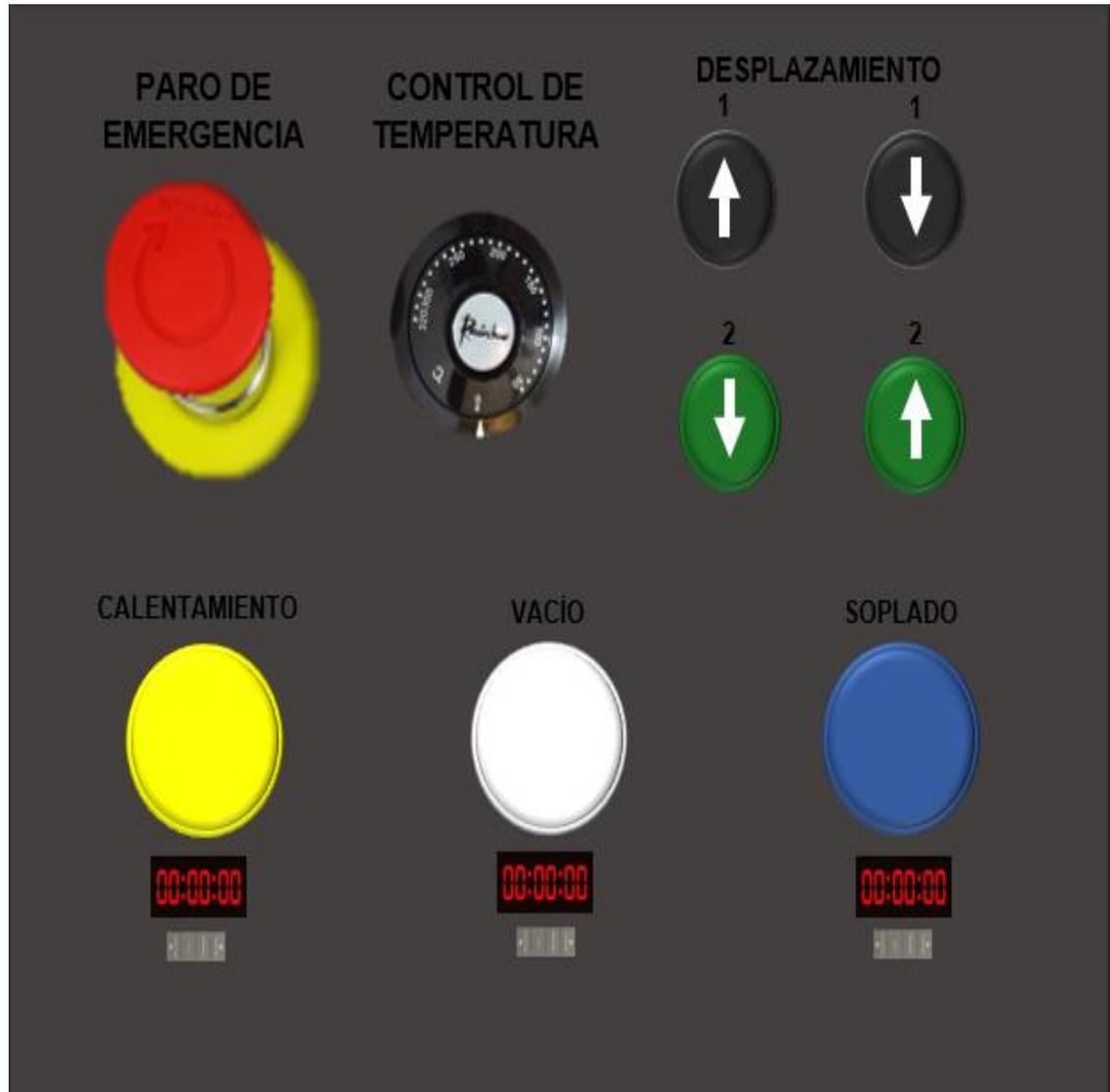
Símbolo	Descripción
	<p>Hace referencia al paro de emergencia, encargado de cortar cualquier tipo de acción que se esté generando durante el proceso de formado cuya finalidad es evitar graves accidentes.</p>
	<p>Temporizador digital, encargado de mostrar el conteo y cantidad de tiempo que actúa cada sistema sobre la lámina; se ubica bajo cada pulsador.</p>
	<p>Controlador de temporizador digital; permite aumentar, disminuir la cantidad de tiempo que cada sistema actúa sobre la lámina.</p>

	<p>Pulsador con coloración amarilla; encargado de encender el sistema de calentamiento para deformar la lámina de polímero.</p>
	<p>Pulsador con coloración blanca; encargado de encender el sistema de vacío para evacuar el aire que se almacena entre el molde y la lámina.</p>
	<p>Pulsador con coloración azul; encargado de encender el sistema de soplado para forzar al polímero a tomar la forma del molde a través de presión positiva.</p>
	<p>Pulsador con coloración negra y flecha apuntando al norte; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°1 que desplaza el conjunto de vacío hacia arriba.</p>
	<p>Pulsador con coloración negra y flecha apuntando al sur; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°1 que desplaza el conjunto de vacío hacia abajo.</p>
	<p>Pulsador con coloración verde y flecha apuntando al sur; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°2 que desplaza el conjunto de soplado hacia abajo.</p>
	<p>Pulsador con coloración verde y flecha apuntando al norte; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°2 que desplaza el conjunto de soplado hacia arriba.</p>

Nota. Descripción de elementos de instrumentación que controlan los sistemas que conforman la máquina de termoformado.

Figura 3.

Panel de control de máquina de termoformado.



Nota. Panel del control completo de la máquina de termoformado multifuncional.

La obtención de los cálculos anteriores comprueba que las dimensiones del molde no superan el límite permitido para causar un sobre estiramiento.

RECOMENDACIONES

- Tenga en cuenta las propiedades y características que influyen en correcto desarrollo del proceso de formado por vacío.

Tabla 2.

Propiedades de los polímeros a utilizar en el proceso de formado.

Material	Poliestireno (PS)	Cloruro de polivinilo (PVC)	Poliéster (PET)
Temperatura de formado (°C)	145-180	160-200	145-175
Espesor lámina (mm)	3		
Tamaño aprovechable de la lámina (cm)	40x40		
Tiempo de vacío y soplado recomendado(s)	5		
Tiempo de calentamiento(s)	43	60	47

Nota. Caracterización de los polímeros a temperatura, dimensión y espesor en los cuales opera la máquina de termoformado multifuncional. Tomado de: Trabajo fin de master, Termoformado de geometrías complejas. [En línea] Disponible en <https://n9.cl/3f5g>

- La relación máxima de estiramiento no debe superar el valor de 3.
- No exceda la temperatura de formado de cada polímero.
- Use de manera adecuada las boquillas.
- La cantidad de vacío y soplado puede variar de acuerdo al tipo de molde que se utilice, se recomiendan 5 segundos para geometrías con pocos detalles y profundidad, en caso de no presentar estas características se debe hallar de forma práctica mediante prueba y ensayo.
- Determine la carrera que debe desplazarse el cilindro con la plataforma de soplado con respecto al molde seleccionado.
- El tiempo de calentamiento puede variar de acuerdo al tiempo en el que las resistencias lleguen a la temperatura de operación.

Tabla 3.

Boquillas para soplado.

Boquillas	Descripción
	Boquilla exair con compresión de aire 25 veces más efectiva, permite el escape rápido pero seguro de aire a grandes volúmenes y velocidades; se usa para moldes con profundidades menores a 5 cm.
	Boquilla de soplado UEA D020 que produce un potente chorro de aire concentrado en un punto de impacto bien definido, diseñada para agujeros profundos y ciegos mayores a 5 cm.

Nota. Caracterización de boquillas para formado por soplado.

PROCEDIMIENTO.

Luego de realizar los cálculos y contar con la información necesaria ejecute el paso a paso del procedimiento de uso de la máquina de termoformado multifuncional.

8. INSTALACIÓN DE MOLDE Y BOQUILLA

El molde de formado por soplado requiere del sistema de sujeción que se incluye en la plataforma de vacío para obtener una geometría de mayor calidad, el sistema consta de 4 tornillos que se deben ajustar a la plataforma con ayuda de un destornillador, a su vez debe definir si la geometría a formar es muy profunda y seleccionar el tipo de boquilla más adecuado para realizar el formado de acuerdo a lo que indica la **Tabla 3**; la instalación de la boquilla se realiza con una rosca de ¼” que cuenta la plataforma de soplado.

9. SUJECIÓN DE LÁMINA

Verifique que el sistema de calentamiento se encuentre en la parte izquierda de la máquina de termoformado y que no impida el movimiento de la plataforma de

sujeción, seguido a esto ubique la lámina semielaborada en medio de la plataforma de sujeción; finalmente asegure que la plataforma este correctamente afianzada sobre los sujetadores rápidos.

10. TIEMPO EN MECANISMOS

Determine el tiempo de calentamiento en que las resistencias eléctricas de cuarzo, la bomba de vacío y el sistema de soplado van actuar sobre la lámina de polímero, mediante los controladores de cada temporizador digital.

11. CALENTAMIENTO DE LÁMINA

Manteniendo la lámina sujeta a la plataforma de sujeción, desplace el sistema de calentamiento sobre ella haciendo uso de sus manos, accione el pulsador amarillo y espere el tiempo especificado para el tipo de polímero que este deformando, finalmente retire el sistema hasta su posición inicial cuando el temporizador digital indique 00:00:00; el sistema de calentamiento se apagará automáticamente cuando transcurra la cantidad de tiempo especificada para cada polímero.

12. FORMADO

Al terminar el desplazamiento del sistema de calentamiento accione el pulsador verde con nomenclatura 2 y símbolo ↓ para accionar el cilindro que desplaza el conjunto de sistema de soplado; de manera simultánea accione el pulsador negro con nomenclatura 1 y símbolo ↑ para accionar el cilindro que desplaza el conjunto de la mesa de vacío con su respectivo molde, cuando esta llegue al final de su carrera accione el pulsador azul con nomenclatura **SOPLADO** para generar presión positiva sobre la pieza durante el tiempo especificado en el temporizador digital, que se dará a través de las boquillas hasta que la lámina tome la forma del molde, de manera opcional puede activar el pulsador blanco con nomenclatura **VACÍO** para generar vacío sobre la pieza y hacer uso de la técnica combinada de vacío y soplado.

13. ENFRIAMIENTO

El formado por soplado inyecta aire que de manera sincrónica forma la pieza y la enfría.

14. TERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Accione el pulsador verde con nomenclatura 2 y simbología ↑ para que el cilindro del sistema de soplado vuelva a su posición inicial; cuando la pieza este a temperatura ambiente retire los seguros de la plataforma de sujeción y recorte el material sobrante de la geometría; si desea formar otra geometría accione el pulsador negro con nomenclatura 1 y simbología ↓ para que el cilindro que desplaza el sistema de vacío vuelva a su posición inicial y repita el ciclo.

4 CÁLCULOS Y RESULTADOS:

- ✓ Registre paso a paso el procedimiento realizado durante la práctica y sopórtelo con imágenes y fotografías.
- ✓ Complemente y describa cada uno de los materiales, equipos y elementos utilizados en la práctica.
- ✓ Determine el porcentaje de adelgazamiento para cada geometría.
- ✓ Seleccione de manera correcta la boquilla para generar soplado.
- ✓ Determine la carrera que debe desplazar el cilindro.
- ✓ Establezca las conclusiones y recomendaciones
- ✓ Registre la bibliografía consultada.

5 REFERENCIAS:

- Plastiglas de México S.A, Manual Técnico termoformado, México, 2012.
- MULTIFAB INCORPORATED , «THERMOFORMING DESIGN GUIDELINES,» *Multifab inc*, pp. 14-15, 2009.

	Elaboró	Revisó	Autorizó
Cargo	Estudiante	Docente	Decanatura o Dirección Ingenierías
Nombre	Juan Sebastián López Rodríguez Edwin Alexander Lozano Buitrago	Ing. OSCAR CHAMARRAVÌ GUERRA	
Firma			

ANEXO 3

GUÍA DE LABORATORIO PARA EL PROCESO DE FORMADO MECÁNICO.

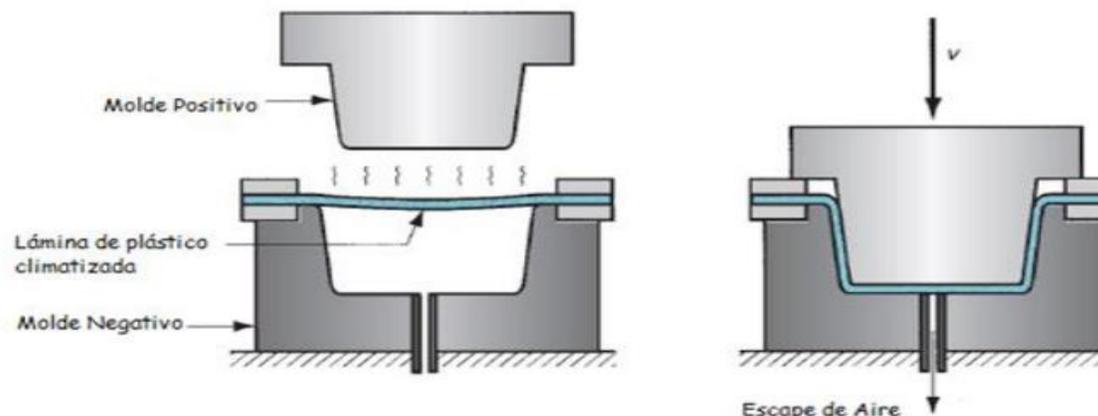
		UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	
PROGRAMAS: INGENIERÍA MECÁNICA		FACULTAD: INGENIERÍAS	
NOMBRE ASIGNATURA: PROCESOS II		CODIGO: 3460L	
PRÁCTICA No. 3	NOMBRE DE LA PRÁCTICA: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE TERMOFORMADO MECÁNICO		

1	INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO:
INTRODUCCIÓN	
<p>Desde la década de los 80's hasta la fecha, las termoformadoras han ganado confianza en su proceso, ya que han ido más allá de sus expectativas; los equipos se han computarizado a tal punto de no requerir más de una persona para su manejo y control gracias a los avances de la electrónica.</p> <p>Este proceso parte de una lámina semi elaborada que ha recibido suficiente calor para ser ablandada y que, posteriormente, por medio de un par de moldes (positivo y negativo) o también llamados molde y contramolde, se obliga a esta a adquirir la forma del molde debido a la presión que ejercen los dos cuando se juntan por el mecanismo de desplazamiento.</p> <p>El moldeo macho-hembra es usado entre otras cosas, para el formado de piezas complicadas. Cuando los moldes se unen entre sí, los contornos forzarán a la hoja a tomar idéntica forma, entre el espacio creado entre los dos moldes; cualquier</p>	

protuberancia en el molde macho, mecánicamente forzará al plástico en la contraparte (molde hembra).

Figura 1.

Formado mecánico.



Nota. Se observan las etapas del proceso de formado con molde y contra molde. Tomado de: Artículo, Diseño y construcción de una máquina termoformadora de plástico con control automático para la empresa Miviltech soluciones industriales s.a. [En línea] Disponible en <https://n9.cl/nl319>

2 OBJETIVO(S):

- ✓ Conocer el proceso de formado mecánico.
- ✓ Practicar la técnica de formado mecánico.
- ✓ Combinar el proceso de formado por vacío, soplado y mecánico.

3 EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y/O MATERIALES:

Por cada grupo de 4 personas:

Laminas semielaboradas de poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC) y poliéster (PET)

- Check list de termoformadora.
- Termómetro infrarrojo láser con sensor de temperatura.
- Molde o geometría para formado en vacío.

Nota. Porcentaje en el que el espesor de la lámina formada se reduce por causa del estiramiento, se determina con el valor de espesor final deseado y se compara con el valor de espesor obtenido al final de la geometría.

El panel de control de la máquina de termoformado multifuncional, cuenta con simbología básica, que permite identificar la función que cumple cada elemento de instrumentación que hace parte de él, sin embargo, en la tabla se describe con mayor exactitud la función que cumple cada elemento y que se debe tener en cuenta en el desarrollo del procedimiento.

Tabla 1.

Descripción de panel de control.

Símbolo	Descripción
	Hace referencia al paro de emergencia, encargado de cortar cualquier tipo de acción que se esté generando durante el proceso de formado cuya finalidad es evitar graves accidentes.
	Temporizador digital, encargado de mostrar el conteo y cantidad de tiempo que actúa cada sistema sobre la lámina; se ubica bajo cada pulsador.
	Controlador de temporizador digital; permite aumentar, disminuir la cantidad de tiempo que cada sistema actúa sobre la lámina.
	Pulsador con coloración amarilla; encargado de encender el sistema de calentamiento para deformar la lámina de polímero.

	<p>Pulsador con coloración blanca; encargado de encender el sistema de vacío para evacuar el aire que se almacena entre el molde y la lámina.</p>
	<p>Pulsador con coloración azul; encargado de encender el sistema de soplado para forzar al polímero a tomar la forma del molde a través de presión positiva.</p>
	<p>Pulsador con coloración negra y flecha apuntando al norte; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°1 que desplaza el conjunto de vacío hacía arriba.</p>
	<p>Pulsador con coloración negra y flecha apuntando al sur; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°1 que desplaza el conjunto de vacío hacía abajo.</p>
	<p>Pulsador con coloración verde y flecha apuntando al sur; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°2 que desplaza el conjunto de soplado hacía abajo.</p>
	<p>Pulsador con coloración verde y flecha apuntando al norte; encargado de permitir el movimiento del cilindro N°2 que desplaza el conjunto de soplado hacía arriba.</p>

Nota. Descripción de elementos de instrumentación que controlan los sistemas que conforman la máquina de termoformado.

Figura 3.

Panel de control de máquina de termoformado.



Nota. Panel del control completo de la máquina de termoformado multifuncional.

La obtención de los anteriores cálculos comprueba que las dimensiones del molde no superan el límite permitido para causar un sobre estiramiento.

RECOMENDACIONES

- Tenga en cuenta las propiedades y características que influyen en correcto desarrollo del proceso de formado por vacío.

Tabla 2.

Propiedades de los polímeros a utilizar en el proceso de formado.

Material	Poliestireno (PS)	Cloruro de polivinilo (PVC)	Poliéster (PET)
Temperatura de formado (°C)	145-180	160-200	145-175
Espesor lamina (mm)	3		
Tamaño aprovechable de la lámina (cm)	40x40		
Tiempo de vacío y soplado recomendado (s)	5		
Tiempo de calentamiento(s)	43	60	47

Nota. Caracterización de los polímeros a temperatura, dimensión y espesor en los cuales opera la máquina de termoformado multifuncional. Tomado de: Trabajo fin de master, Termoformado de geometrías complejas. [En línea] Disponible en <https://n9.cl/3f5g>

- La relación máxima de estiramiento no debe superar el valor de 3.
- No exceda la temperatura de formado de cada polímero.
- Uso adecuado de las boquillas.
- La cantidad de vacío y soplado puede variar de acuerdo al tipo de molde que se utilice, se recomiendan 5 segundos para geometrías con pocos detalles y profundidad, en caso de no presentar estas características se debe hallar de forma práctica mediante prueba y ensayo.
- La carrera del cilindro del sistema de soplado, se debe definir de acuerdo a las dimensiones del molde macho-hembra y el espesor final que se desea obtener mediante prueba y ensayo.
- El tiempo de calentamiento puede variar de acuerdo al tiempo en el que las resistencias lleguen a la temperatura de operación.

Tabla 3.

Boquillas para soplado.

Boquillas	Descripción
	Boquilla exair con compresión de aire 25 veces más efectiva, permite el escape rápido pero seguro de aire a grandes volúmenes y velocidades; se usa para moldes con profundidades menores a 5 cm.
	Boquilla de soplado UEA D020 que produce un potente chorro de aire concentrado en un punto de impacto bien definido, diseñada para agujeros profundos y ciegos > a 5 cm.

Nota. Caracterización de boquillas para formado por soplado.

PROCEDIMIENTO.

Luego de realizar los cálculos y contar con la información necesaria ejecute el paso a paso del procedimiento de uso de la máquina de termoformado multifuncional.

1.INSTALACIÓN DE MOLDE Y BOQUILLA

Los moldes mecánicos macho-hembra requieren del sistema de sujeción que se incluye en la plataforma de vacío y en la plataforma de soplado; el sistema consta de 4 tornillos que se deben ajustar a la plataforma con ayuda de un destornillador, a su vez debe definir si la geometría a formar es muy profunda y seleccionar el tipo de boquilla más adecuado para realizar el formado; la instalación de la boquilla se realiza con una rosca de ¼" que cuenta la plataforma de soplado.

2.SUJECIÓN DE LÁMINA

Verifique que el sistema de calentamiento se encuentre en la parte izquierda de la máquina de termoformado y que no impida el movimiento de la plataforma de sujeción, seguido a esto ubique la lámina semielaborada en medio de la plataforma de sujeción; finalmente asegure que la plataforma este correctamente afianzada sobre los sujetadores rápidos.

3.TIEMPO EN MECANISMOS

Determine el tiempo de calentamiento en que las resistencias eléctricas de cuarzo, la bomba de vacío y el sistema de soplado van actuar sobre la lámina de polímero, mediante los controladores de cada temporizador digital.

4.CALENTAMIENTO DE LÁMINA

Manteniendo la lámina sujeta a la plataforma de sujeción, desplace el sistema de calentamiento sobre ella haciendo uso de sus manos, accione el pulsador amarillo y espere el tiempo especificado para el tipo de polímero que este deformando, finalmente retire el sistema hasta su posición inicial cuando el temporizador digital indique 00:00:00; el sistema de calentamiento se apagará automáticamente cuando transcurra la cantidad de tiempo especificada para cada polímero.

5.FORMADO

Al terminar el desplazamiento del sistema de calentamiento accione el pulsador verde con nomenclatura 2 y símbolo ↓ para accionar el cilindro que desplaza el conjunto de sistema de soplado y molde macho;de manera simultánea accione el pulsador negro con nomenclatura 1 y símbolo ↑ para accionar el cilindro que desplaza el conjunto de la mesa de vacío con su respectivo molde hembra, cuando esta llegue al final de su carrera de manera opcional para obtener mejor acabado,accione el pulsador azul con nomenclatura **SOPLADO** para generar presión positiva sobre la pieza durante el tiempo especificado en el temporizador digital, que se dará a través de las boquillas hasta que la lámina tome la forma del molde, al igual que tiene la posibilidad de activar el pulsador blanco con nomenclatura **VACÍO** para generar vacío sobre la pieza y hacer uso de la técnica combinada de vacío, soplado y mecánico.

6.ENFRIAMIENTO

El formado mecánico cuenta con ayuda del sistema de soplado que inyecta aire que de manera simultánea forma la pieza y la enfría.

7.TERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Accione el pulsador verde con nomenclatura 2 y simbología ↑ para que el cilindro del sistema de soplado vuelva a su posición inicial; cuando la pieza este a temperatura ambiente retire los seguros de la plataforma de sujeción y recorte el material sobrante de la geometría; si desea formar otra geometría accione el pulsador negro con nomenclatura 1 y simbología ↓ para que el cilindro que desplaza el sistema de vacío vuelva a su posición inicial y repita el ciclo.

4 CÁLCULOS Y RESULTADOS:

- ✓ Registre paso a paso el procedimiento realizado durante la práctica y sopórtelo con imágenes y fotografías.
- ✓ Complemente y describa cada uno de los materiales, equipos y elementos utilizados en la práctica.
- ✓ Determine el porcentaje de adelgazamiento para cada geometría.
- ✓ Seleccione de manera correcta la boquilla para generar soplado.
- ✓ Determine la carrera adecuada para el cilindro del sistema de soplado.
- ✓ Establezca las conclusiones y recomendaciones
- ✓ Registre la bibliografía consultada.

5 REFERENCIAS:

- Plastiglas de México S.A, Manual Técnico termoformado, México, 2012.
- MULTIFAB INCORPORATED , «THERMOFORMING DESIGN GUIDELINES,» *Multifab inc*, pp. 14-15, 2009.

	Elaboró	Revisó	Autorizó
Cargo	Estudiante	Docente	Decanatura o Dirección Ingenierías

Nombre	Juan Sebastián López Rodríguez Edwin Alexander Lozano Buitrago	Ing. OSCAR CHAMARRAVÌ GUERRA	
Firma			

**ANEXO 4
COTIZACIÓN TERMOFORMADOS OSORNO.**



Bogotá, 0 16 de junio del 2021

No. TFO-011-06-2021

señor: **EDWIN ALEXANDER LOZANO.**

Atendiendo a su solicitud, estamos presentando la siguiente cotización:

ITEM	SERVICIO	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
1	MÁQUINA PARA TERMOFORMADO NEUMÁTICA	1	9.500.000	9.500.000
	Medidas: 50cms* 50cms area útil			
	Altura de termoformado 25cms			
	Pintura electro estática			
	Color sugerido por el cliente			
	Horno (resistencias) 220			
	Bomba de vacío importada de 1.5 caballos(de ser necesaria)			
	Estructura metálica cal 18 tubular			
	Tanque de reserva o pulmón			
	Control de temperatura análogo			
	Testigos o bombillos LED			
	Refrigeración automática			
	Desmoldeo con aire			
No aplica para termoformado en acrílico solo para Poliestireno				
TOTAL			9.500.000	

Bomba de vacío importada

- * Fabricación en 25 días hábiles aproximadamente
- * Garantía 1 año, NO incluye partes eléctricas, mala manipulación de la máquina, ni daños ocasionados en el transporte
- * De requerirse transporte instalación o inducción en la ciudad de destino, los gastos corren por parte del comprador
- * Sistema de pago: 60% anticipado - 40% contra entrega de la máquina en Bogotá y debidamente ensayada
- * Validez de la cotización: 30 días
- * Somos persona natural, régimen común
- * Los valores NO incluyen IVA



ANEXO 5

COTIZACIÓN UNIVERSAL MAQUINARÍA Y GUILLOTINAS S.A.S



Bogotá D.E 17 0006 2021

Sr. Edwin Alexander Lozano Buitrago

edwinalex45@hotmail.com

Móvil: 3212340426

COTIZACION TERMO FORMADORA

Características:

Área de termo formado 40X50 cm.

Sistema neumático.

Horno con resistencias blindadas

Doble formato.

Bomba de vacío con compresor y motor trifásico de un H.P

Tablero de controles con sus respectivos componentes eléctricos

No incluye compresor de aire ni el IVA

Valor.....\$14.500.000

Asesoría gratuita en la fabricación de moldes.

Garantía un año, tiempo de entrega una semana

El transporte corre por cuenta del comprador

Esperando que la presente sea de su entero agrado

Cordialmente

ABRAHAM GIRALDO

Ing. Diseño Industrial

Bogotá carrera 27ª No 3-27 cel 3114553155

Email: universaldemaquinariarsas@gmail.com

www.universaldemaquinaria.com

ANEXO 6
COTIZACIÓN VERPACKEN.

	PROPUESTA COMERCIAL			Cotización No: 12716
	Emitido por gestión de calidad	Fecha:10-08-11	Revisión:1	VT -02-01

Bogotá D.C, 23 de abril del 2021

Señores:

UNIVERSIDAD AMERICA

Verpacken Ltda. Es una compañía con gran experiencia en el sector de la industria manufacturera, alimenticia, farmacéutica, química entre otros, contamos con más de 18 años al servicio de la industria. Fabricamos equipos propios y distribuimos equipos de las empresas y marcas líderes a nivel mundial que le otorgarán la seguridad y respaldo tecnológico que necesita para cumplir óptimamente sus procesos productivos, ventaja que se traduce en productos de excelente calidad y rendimiento

TERMOFORMADORA SEMIAUTOMATICA MODELO VPK 50 x50 cm



Esta foto es de referencia, el equipo final puede variar según la aplicación de cada cliente.

No	PARTE	DESCRIPCIÓN
A	Horno	Calentamiento película

**Bogotá Calle 80 – Autopista Medellín Parque Agroindustrial de Occidente,
Bodega 2 Local 1215 PBX: (571) 864 34 61
www.verpacken.com.co**

	PROPUESTA COMERCIAL			Cotización No: 12716
	Emitido por gestión de calidad	Fecha:10-08-11	Revisión:1	VT -02-01

ESPECIFICACIONES TECNICAS

Voltaje de trabajo:	220 V 3 Fases
Potencia:	18 kw
Velocidad promedio de Empaque	40-50 Plancha por Hora. (Según el paquete)
Presión Requerida de Aire	70 PSI.
Consumo de aire	1.5 CFM
Vacío Necesario	5CFM
Dimensiones de Termoformado	Ancho 50cm Largo 50 cm
Altura Máxima de Termoformado	15 Cms
Dimensiones Generales	Ancho 110cm Alto 1.10m Largo 150 cm
Características:	
Alimentación Plastico	Manual
Movimiento Horno	Automatico
Ciclo vacio	Automatico
Tanque de vacio y Bomba	Incluidos
Zonas de calentamiento	3 zonas de manejo independiente
Control temperatura	3
Control del equipo	Logo Siemens con Pantalla
Enfriamiento película	Ventiladores Axiales
Tipos materiales Termofirmar	Poliestireno, PET, PVC, Fomi.
Estructura:	Acabado en pintura electrostática
Garantía:	12 meses.

**Bogotá Calle 80 – Autopista Medellín Parque Agroindustrial de Occidente,
Bodega 2 Local 1215 PBX: (571) 864 34 61
www.verpacken.com.co**

 VERPACKEN <small>especialista en procesos y maquinaria</small>	PROPUESTA COMERCIAL			Cotización No: 12718
	Emitido por gestión de calidad	Fecha:10-08-11	Revisión:1	VT -02-01

Valor de la Inversión

Ítem	DESCRIPCIÓN	Valor Unitario En Pesos
1	Termoformadora MODELO VTF 50 x 50	\$ 46.000.000

NOTA: No incluye moldes, los moldes se compran por separado. Sugerimos un proveedor al cliente, de igual manera el cliente tiene la libertad de escoger su proveedor.

CONDICIONES COMERCIALES	
Recargo IVA	19%
Puesta en Marcha	Incluido Bogotá, fuera de Bogotá tiene costo adicional
Transporte	Incluido Bogotá, fuera de Bogotá tiene costo adicional
Forma de Pago	70 % Anticipo 20 % para despacho 10% contra entrega
Tiempo de Entrega	60 días hábiles después de Orden de compra y Anticipo.
Garantía	12 Meses

Fabiola Hernández Arana
Asesora Comercial y Proyectos
 Verpacken Limitada
 Tel. 864-34-61
 Cel. 3178935960

4 Razones por las cuales somos la mejor opción de compra

- **Verpacken** cuenta con un área de soporte técnico 7 x 24, 365 días al año. Con profesionales dedicados a atender a nuestros clientes.
- **Verpacken** es una empresa consolidada con más de 18 años de trayectoria y experiencia fabricando equipos lo que nos permite conocer con gran detalle el funcionamiento eléctrico, mecánico y neumático de todas nuestras maquinas.
- **Verpacken** le ofrece 2 visitas de mantenimiento preventivo totalmente gratuitas durante el tiempo de garantía.

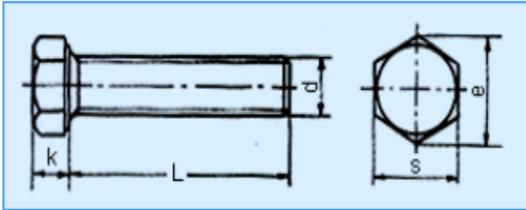
**Bogotá Calle 80 – Autopista Medellín Parque Agroindustrial de Occidente,
 Bodega 2 Local 1215 PBX: (571) 864 34 61
 www.verpacken.com.co**

ANEXO 7

CATÁLOGO TORNILLOS HEXAGONALES ROSCA COMPLETA

TORNILLO HEXAGONAL ROSCA COMPLETA

DIN 933



GRADO DE RESISTENCIA
8.8
10.9
12.9

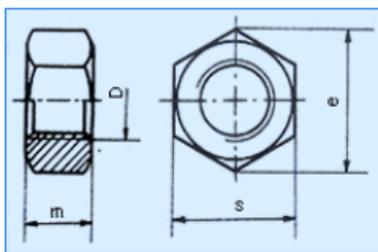
														mm
Rosca	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
Paso	0.7	0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	2	2.5	2.5	2.5	3	3	3.5
k	2.8	3.5	4	5.3	6.4	7.5	8.8	10	11.5	12.5	14	15	17	18.7
e	Grado A	7.66	8.79	11.05	14.38	18.9	21.1	24.49	26.75	30.14	33.53	35.72	35.98	50.85
	Grado B	-	8.63	10.89	14.2	18.72	20.88	23.91	26.17	29.56	32.95	35.03	39.55	50.85
S	7	8	10	13	17	19	22	24	27	30	32	36	41	46
L	8-40	8-40	8-50	12-60	16-60	20-80	25-80	30-100	30-100	40-100	50-100	50-100	60-100	70-100

ANEXO 8

CATÁLOGO TUERCAS HEXAGONALES.

TUERCAS HEXAGONALES

DIN 934



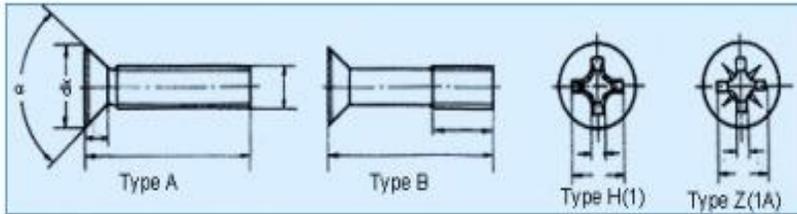
										mm
Rosca	M2	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	
Paso	0.4	0.5	0.7	0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	
m	1.6	2.4	3.2	4	5	6.5	8	10	13	
e	4.32	6.01	7.66	8.79	11.05	14.38	18.9	21.1	16.75	
s	4	5.5	7	8	10	13	17	19	24	
Rosca	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56			
Paso	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5			
m	16	19	24	29	34	38	45			
e	32.95	39.55	50.85	60.79	71.3	82.6	93.56			
s	30	36	46	55	65	75	85			

ANEXO 9

CATÁLOGO TORNILLOS CABEZA AVELLANADA PLANA

TORNILLO DE CABEZA AVELLANADA PLANA

DIN 965



mm

Rosca	M3	M3.5	M4	M5	M6	M8	M10
dk	5.6	6.5	7.5	9.2	11	14.5	18
k	1.65	1.93	2.2	2.5	3	4	5
Cruz	(Tipo H)m	2.9	3.9	4.4	4.6	6.6	8.7
	(Tipo Z)m	2.8	3.7	4	4.4	6.1	8.5
		1	2	2	2	3	4
L	Tipo A	6-22	6-22	8-25	8-28	10-35	14-40
	Tipo B	25-30	25-35	28-40	30-50	40-60	45-80

ANEXO 10

ACOPLE RÁPIDO PARA AIRE MACHO

ACOPLE RÁPIDO PARA AIRE

REFERENCIA TCM /SERIE T1210 /T1310

ACOPLADOR AUTOMÁTICO MACHO

CODIGO	REFERENCIA	CUERPO	ROSCA	PRESIÓN TRABAJO PSI	FLUJO A 100 PSI CFM
T268657244	TCM4-4	1/4" ACERO	1/4"-18 NPT	300	37
T268657246	TCM4-6	1/4" ACERO	3/8"-18 NPT	300	37
T268657266	TCM6-6	3/8" ACERO	3/8"-18 NPT	300	70
T268657268	TCM6-8	3/8" ACERO	1/2"-14 NPT	300	70



ANEXO 11

ACOPLE RÁPIDO PARA AIRE HEMBRA.

ACOPLE RÁPIDO PARA AIRE
REFERENCIA TNH / SERIE T1210 / T1310
NIPLE HEMBRA

CODIGO	REFERENCIA	CUERPO	ROSCA	PRESIÓN TRABAJO PSI	FLUJO A 100 PSI CFM
T268658344	TNH4-4	1/4" ACERO	1/4"-18 NPT	300	37
T268658346	TNH4-6	1/4" ACERO	3/8"-18 NPT	300	37
T268658366	TNH6-6	3/8" ACERO	3/8"-18 NPT	300	70
T268658368	TNH6-8	3/8" ACERO	1/2"-14 NPT	300	70



ANEXO 12

TEMPORIZADOR DIGITAL MULTIFUNCIÓN

