
Diseño y fabricación de una máquina tipo *sheetpress* para la producción de planchas plásticas recicladas

Pablo David Fuentes Miranda



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño y fabricación de una máquina tipo *sheetpress* para la
producción de planchas
plásticas recicladas**

Trabajo de graduación presentado por Pablo David Fuentes Miranda
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

(f) 
Msc. Carlos Esquit

Fecha de aprobación: Guatemala, 24 de noviembre de 2025.

Índice de figuras	VI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
2.1. Precious Plastic	2
2.2. Sheetpress en Vaughn College	3
2.3. Precious Plastic Monash University	3
2.4. Polyvora	3
3. Justificación	4
4. Objetivos	5
4.1. Objetivo general	5
4.2. Objetivos específicos	5
5. Definición del problema	6
6. Marco teórico	7
6.1. Polímeros	7
6.2. Tipos comunes de plásticos reciclables	8
6.3. Recoleccion, clasificacion y limpieza	9
6.4. Comportamiento térmico de polímeros	10
6.5. Transferencia de calor	11
6.6. Control y ajuste de parámetros	12
6.7. Presión y moldeado	13
6.8. Estructura metálica	14
7. Requerimientos de diseño	16
7.1. Identificación de necesidades	16
7.2. Adaptación de planos de Precious Plastic	17
7.3. Selección de materiales y componentes	18

8.	Diseño mecánico en computadora	23
8.1.	Modelado CAD	23
8.2.	Simulaciones	28
9.	Fabricación de la máquina	31
9.1.	Integración del sistema eléctrico y térmico	37
9.2.	Integración del sistema hidráulico	39
9.3.	Ensamblaje final	41
10.	Pruebas de funcionamiento	43
10.1.	Metodología de pruebas	43
10.2.	Evaluación de resultados	44
10.3.	Ajustes y mejoras técnicas	45
11.	Conclusiones	47
12.	Recomendaciones	48
13.	Referencias	49
14.	Anexos	52

1.	Máquina <i>sheetpress</i> V1 de Precious Plastic	2
2.	Código de clasificación de polímeros sintéticos	8
3.	Identificación visual de los rangos de fusión en °C para PET y PP . .	9
4.	Pasos para clasificar desechos plásticos	10
5.	Resistencia eléctrica en espiral abierta	12
6.	Bloc cerámico JM23	13
7.	Kit de controlador PID REX C100	14
8.	Captura de pantalla del sitio web de Precious Plastic Academy	17
9.	Marco lateral	24
10.	Marco superior	24
11.	Marco inferior	25
12.	Base inferior	25
13.	Unión de la base con los marcos laterales	26
14.	Unión de marcos laterales con marco superior	26
15.	Unión de marcos laterales con marco inferior	27
16.	Base con tríquet hidráulico instalado	27
17.	Estructura metálica ensamblada	28
18.	Modelo CAD con malla de elementos finitos aplicada	29
19.	Tensión normal máxima	30
20.	Gráfica del desplazamiento	30
21.	Sierra eléctrica Milwaukee, modelo 6370-21	32
22.	Proceso de corte en perfiles de acero	32
23.	Soldadora multiprocesos 160 A modelo Infinity 160 A	33
24.	Proceso de soldadura en perfiles metálicos	33
25.	EPP utilizado en el proceso de corte de perfiles metálicos y maquinado de bloques cerámicos	34
26.	Ladrillos JM-23 maquinados, resistencias eléctricas instaladas	34
27.	Bloques cerámicos con resistencias instaladas dentro del marco calefactor	35
28.	Instalación de fibra cerámica en el marco calefactor	35

29.	EPP requerido para el manejo de fibra cerámica	36
30.	Vista final del marco calefactor inferior	37
31.	Vista general de la caja eléctrica de la máquina	38
32.	Termocupla instalada en el centro del marco calefactor	39
33.	Integración del sistema hidráulico en la estructura	40
34.	Guías impresas laterales en PET	40
35.	Estructura completa de la máquina ensamblada	41
36.	Prueba de fundición de material plástico	44
37.	Plano de fabricación	53
38.	Plano de fabricación	54
39.	Plano de fabricación	55
40.	Plano de fabricación	56
41.	Plano de fabricación	57
42.	Plano de fabricación	58
43.	Plano de fabricación	59
44.	Plano de fabricación – Página 8.	60

CAPÍTULO 1

Introducción

El reciclaje de plásticos constituye uno de los principales desafíos ambientales y tecnológicos del siglo XXI. A pesar de sus propiedades ventajosas, como la resistencia, ligereza y bajo costo, los plásticos generan un impacto negativo considerable cuando no se gestionan de forma adecuada. Esta situación ha impulsado la búsqueda de soluciones que permitan transformar los residuos plásticos en materiales reutilizables, especialmente en áreas relacionadas con el diseño mecánico y la manufactura digital.

En este contexto, surge la propuesta de diseñar y fabricar una máquina tipo sheetpress, cuya función es fundir plásticos triturados y prensarlos en planchas mediante la aplicación de calor y presión. A diferencia de otros equipos de reciclaje, como extrusoras o inyectoras, la sheetpress produce láminas de mayor tamaño, adecuadas para procesos de corte, mecanizado y prototipado. El presente trabajo toma como referencia los planos de código abierto del movimiento internacional Precious Plastic, adaptándolos a la realidad local mediante el uso de materiales disponibles en el mercado nacional y modificaciones propias en el diseño.

El objetivo principal de este trabajo de graduación es aportar a la Universidad del Valle de Guatemala una herramienta tecnológica que fortalezca la implementación de un laboratorio de reciclaje en el Departamento de Electrónica, Mecatrónica y Biomédica. Con ello se busca no solo reincorporar residuos plásticos en forma de planchas recicladas, sino también promover la innovación, la sostenibilidad y el aprendizaje práctico en el ámbito académico.

Para la elaboración de este documento se utilizaron herramientas de inteligencia artificial únicamente como apoyo en la corrección de redacción y en la formulación de sugerencias estilísticas. Todas las decisiones técnicas, cálculos, diseños y contenidos fueron desarrollados íntegramente por el autor.

2.1. Precious Plastic

Dave Hakkens inició el movimiento de *Precious Plastic* en 2013 [1] con el propósito de fomentar y fortalecer el reciclaje para combatir los cambios climáticos provocados por los desechos plásticos. Este movimiento se enfocó en diseñar y fabricar máquinas para transformar los residuos plásticos en materia prima para crear nuevos objetos y productos. Entre las máquinas que se desarrollaron en este proyecto destaca la *sheetpress*, para utilizar plástico triturado y crear planchas recicladas. El método que emplea consiste en fundir el material mediante la combinación de calor y presión, utilizando resistencias eléctricas instaladas sobre dos planchas de aluminio, que generan presión a través de un gato hidráulico [2]. La Figura 1 ilustra la primera versión de esta máquina, la cual ha sido replicada exitosamente en diversos países [3], gracias a los tutoriales y documentos que están disponibles de manera gratuita en la página del movimiento.



Figura 1. Máquina *sheetpress* V1 de Precious Plastic

2.2. Sheetpress en Vaughn College

El proyecto realizado en Vaughn College [4] tuvo como objetivo diseñar y fabricar una máquina tipo *sheetpress* accesible y económica para reutilizar residuos de PLA generados por impresión 3D en el campus. Durante la fase de diseño, los estudiantes evaluaron distintos sistemas de presión como hidráulicos, actuadores lineales y mecanismos de bisagra, seleccionando finalmente actuadores lineales debido a su costo más bajo y disponibilidad en el mercado local. Para derretir la viruta de plástico, utilizaron resistencias tipo cartucho para asegurar un calentamiento rápido y uniforme del material, controladas electrónicamente con un Arduino Mega 2560. Esta plataforma se encargó también de gestionar el movimiento de los actuadores lineales, así como del monitoreo continuo de la temperatura mediante termistores y ventiladores de refrigeración para garantizar un funcionamiento seguro y preciso del equipo. El resultado del proyecto fue una máquina completamente funcional capaz de transformar residuos de PLA en planchas recicladas.

2.3. Precious Plastic Monash University

Precious Plastic Monash desarrolló una versión compacta y portátil de un sistema de reciclaje de plástico llamada Unidad de Integración [5]. Esta integra las máquinas: trituradora, inyectora, extrusora y *sheetpress* en una plataforma de 1x1 metro, equipada con ruedas para facilitar su movilidad. Al desplegarse completamente ocupa un área de 3x3 metros y cuenta con almacenamiento para herramientas y moldes. Tiene instaladas pantallas para demostraciones en vivo y con videos demostrativos. El diseño móvil de esta unidad permite realizar talleres y actividades educativas en diversos espacios y comunidades, lo que representa una importante consideración para proyectos similares que busquen versatilidad y facilidad de transporte en sus equipos.

2.4. Polyvora

Polyvora desarrolló la Desktop *sheetpress* 20 in, una máquina compacta diseñada para la producción de láminas recicladas de plástico. Esta versión, identificada como V4, está construida con un marco robusto de acero reforzado y componentes de acero cortados con láser, lo que garantiza su durabilidad y resistencia. La máquina está disponible en dos configuraciones de voltaje, 120 V CA y 240 V CA, adaptándose así a diferentes estándares eléctricos. Con una potencia de 1.6 kW, puede operar hasta 8 horas diarias y alcanzar temperaturas máximas de 270 grados Celsius. Es capaz de procesar diversos tipos de plásticos, incluyendo HDPE, LDPE, PP y PS, transformándolos en láminas cuadradas de 20 pulgadas (aproximadamente 510 mm), con espesores que varían entre 3 y 25 mm. Dependiendo del grosor seleccionado, la máquina puede producir entre 3 y 5 láminas de 12 mm de espesor por día [6].

El Departamento de Ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Biomédica de la Universidad del Valle de Guatemala está implementando un laboratorio de reciclaje. Una de las máquinas que se desea incorporar es una tipo *sheetpress*, la cual permitirá fabricar planchas de plástico reciclado para su uso en máquinas fresadoras.

Este proyecto sigue el modelo propuesto por Precious Plastic, cuyo objetivo es que cualquier persona pueda reciclar plástico y contribuir a la solución del problema de los desechos plásticos [1]. En 2023, dicha organización publicó su informe de resultados correspondiente al año 2022, celebrando el logro de haber reciclado 595,400 toneladas de plástico en 107 países, con 1,881 máquinas construidas en ese año [7]. Este gran logro demuestra que el sistema de código abierto que impulsa la idea de un sistema global de reciclaje de plástico a pequeña escala impulsado por personas podría aliviar significativamente la crisis del plástico [7].

El objetivo principal de este trabajo de graduación es diseñar y fabricar una máquina tipo *sheetpress* para producir planchas de plástico reciclado destinadas al taller del Departamento de Ingeniería. Las planchas tendrán un tamaño de 80 cm por 120 cm, dimensiones comerciales en materiales como madera y MDF, aunque también será posible fabricar planchas de tamaños menores. La máquina tendrá la capacidad de variar el espesor desde 3 mm hasta 25.4 mm, lo cual también corresponde a valores comerciales. Con este proyecto se hará una contribución directa y local a la lucha contra el problema ambiental derivado del manejo inadecuado de los desechos plásticos.

4.1. Objetivo general

Desarrollar una máquina tipo *sheetpress* basado en los diseños de Precious Plastic, para el laboratorio de reciclaje del Departamento de Electrónica, Mecatrónica y Biomédica de la Universidad del Valle de Guatemala.

4.2. Objetivos específicos

- Realizar el diseño mecánico en computadora de la máquina.
- Fabricar la máquina con base en el diseño mecánico elaborado previamente.
- Realizar pruebas técnicas de funcionamiento.
- Elaborar manuales de uso y mantenimiento de la máquina.

Definición del problema

La producción de planchas plásticas recicladas mediante compresión térmica requiere una máquina tipo sheetpress adaptada a materiales locales y construida específicamente para su implementación en un entorno académico.

El problema abordado en este trabajo consistió en la falta de una herramienta capaz de transformar residuos plásticos en planchas reutilizables para procesos de fabricación digital dentro de un laboratorio universitario. Para responder a esta necesidad, el proyecto se enfocó en el diseño y construcción de una máquina tipo *sheetpress*, tomando como referencia los diseños de Precious Plastic y adaptándolos a los materiales, herramientas y condiciones disponibles localmente.

El proyecto se centró exclusivamente en el desarrollo del sistema mecánico, térmico, eléctrico e hidráulico necesarios para generar el proceso de compresión térmica, así como en la integración de estos sistemas dentro de una estructura funcional. El trabajo comprende la selección de materiales, el diseño estructural, la implementación del sistema de calentamiento, la integración del sistema hidráulico de prensado y la validación inicial mediante pruebas de funcionamiento básicas.

Este planteamiento está en concordancia con el objetivo general del proyecto: desarrollar una máquina tipo *sheetpress*, basada en los diseños de Precious Plastic, para el laboratorio de reciclaje del Departamento de Electrónica, Mecatrónica y Biomédica de la Universidad del Valle de Guatemala.

6.1. Polímeros

Un polímero es una cadena molecular larga compuesta por unidades repetitivas denominadas monómeros [8] la configuración de dichas cadenas se ve reflejada en las propiedades del polímero.

La importancia de los polímeros radica en la gran diversidad de propiedades que presentan. Algunos polímeros son rígidos, otros flexibles y pueden moldearse. Algunos son estables a altas temperaturas, otros no. Algunos son duros mientras que otros son blandos [9].

Existen dos grandes tipos de polímeros [10]: naturales y sintéticos.

Los polímeros naturales son macromoléculas presentes en los seres vivos y cumplen funciones biológicas esenciales.

Por otro lado, los polímeros sintéticos se producen artificialmente en condiciones controladas, a partir de monómeros derivados principalmente del petróleo. Se clasifican en termoplásticos, termoestables y elastómeros, y entre los más conocidos se encuentran el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el tereftalato de polietileno (PET) y polietileno de alta densidad (HDPE). Su versatilidad los convierte en materiales indispensables en envases, textiles, construcción y aplicaciones médicas.

Figura 2. Código de clasificación de polímeros sintéticos



6.2. Tipos comunes de plásticos reciclables

El polipropileno (PP) es un termoplástico semicristalino ampliamente utilizado por su baja densidad, buena resistencia química y relativa facilidad de procesamiento. Su punto de fusión se sitúa en un rango de 160 a 165 °C [11], lo que lo hace adecuado para procesos de compresión térmica controlada. Una característica importante es su resistencia a la fatiga por flexión, lo que lo convierte en un material común en bisagras y elementos sometidos a esfuerzos repetidos. Sin embargo, presenta limitaciones frente a la degradación térmica y fotooxidativa, por lo que requiere estabilizantes cuando se recicla o se expone a ciclos repetidos de calor.

El polietileno de alta densidad (HDPE) destaca por su alta cristalinidad y densidad relativamente baja, lo que le confiere rigidez, resistencia al impacto y estabilidad frente a agentes químicos. Su punto de fusión oscila entre 125 y 135 °C [11], siendo más bajo que el del PP. En procesos de reciclaje, conserva gran parte de sus propiedades mecánicas si se controla la degradación térmica, aunque tiende a perder resistencia tras múltiples ciclos de fusión. Su amplia disponibilidad en residuos post-consumo, como envases y contenedores, lo hace uno de los plásticos más reciclados a nivel industrial.

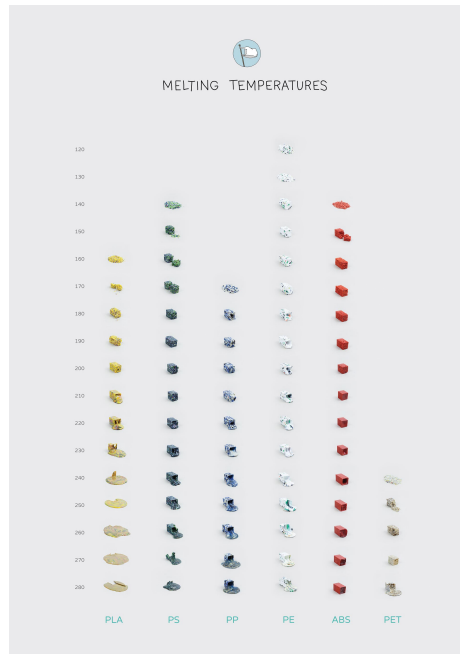
El polietileno tereftalato (PET) es un polímero termoplástico de tipo poliéster con una estructura semicristalina que combina buena resistencia mecánica, alta rigidez y transparencia. Su temperatura de fusión ronda los 250 °C [12]. Es ampliamente usado en envases de bebidas y fibras textiles. .

Fuentes como MatWeb proporcionan datos sobre los puntos de fusión:

- PP moldeado: 61–220 °C [13]
- HDPE moldeado: 118–137 °C [14]
- PET sin refuerzo: 200–260 °C [15]

De acuerdo con la guía práctica publicada por precious plastic academy, es posible identificar visualmente los rangos de fusión de polímeros como PET y PP a partir de pruebas experimentales documentadas por este movimiento. Estas pruebas muestran la manera en que los plásticos cambian de estado con el incremento de la temperatura, lo que permite establecer parámetros prácticos para fundir los materiales. En la Figura 3 se ilustran los rangos de fusión observados para ambos materiales.

Figura 3. Identificación visual de los rangos de fusión en °C para PET y PP



Estos datos, recopilados de diferentes fuentes, muestran los puntos de fusión de los materiales. Conocer este parámetro es fundamental para evitar mezclar polímeros distintos durante el reciclaje.

6.3. Recoleccion, clasificacion y limpieza

Existen diversos métodos de reciclaje de plásticos, entre ellos el mecánico, el químico y la valorización energética [16]. El reciclaje mecánico es el más utilizado, ya que consiste en recolectar, clasificar, limpiar, triturar y reprocesar los plásticos sin alterar su estructura química. Es un proceso eficiente para polímeros termoplásticos como PET, HDPE y PP, y permite obtener nuevos productos con bajo costo y menor impacto ambiental en comparación con otras técnicas.

La recolección y clasificación de plásticos es un paso fundamental para el reciclaje mecánico. Los residuos postconsumo suelen estar mezclados y contaminados, lo que dificulta su procesamiento. Separar los polímeros por tipo es esencial, ya que cada uno posee propiedades térmicas distintas que determinan su fundición y reutilización.

La limpieza también es crítica. Contaminantes como grasas, restos de alimentos, etiquetas o adhesivos afectan la calidad del material reciclado y reducen sus propiedades mecánicas. Por ello, el lavado y secado son procesos necesarios antes de la trituración.

Finalmente, los plásticos clasificados y limpios se trituran en escamas o partículas pequeñas. Este formato facilita su fundición posterior y asegura una mayor homogeneidad en los productos reciclados [17].

Figura 4. Pasos para clasificar desechos plásticos



Nota. Ilustración del proceso para recopilar, clasificar y limpiar plásticos

6.4. Comportamiento térmico de polímeros

Un estudio sobre el comportamiento térmico de plásticos reciclables señala que el PP alcanza su punto de fusión más intenso entre 160 y 170 °C, mientras que el HDPE funde alrededor de 143 °C. El PET presenta el valor más alto, con fusión intensa en torno a 255 °C [18].

Estos valores corresponden a resultados experimentales obtenidos en estudios recientes y muestran una buena concordancia con los valores teóricos reportados en la literatura y presentados en la sección anterior. Esta relación confirma que los polímeros funden en rangos bien establecidos, lo cual respalda la validez de emplear dichos parámetros como referencia inicial para el diseño y operación de procesos de fundición.

El mismo estudio identifica la aparición de gases y humos cuando los materiales

superan ciertas temperaturas. El PP y el HDPE muestran mayor emisión de CO₂ a temperaturas de combustión alrededor de 650 °C. El PET, por su estructura aromática, libera humos amarillentos y compuestos secundarios, incluyendo aldehídos y ácidos, siendo el polímero con mayor riesgo de emisiones contaminantes [18].

La degradación de los plásticos ocurre a temperaturas más altas que su fusión. El PP inicia su degradación cerca de 290 °C y puede extenderse hasta 480 °C. El HDPE comienza a degradarse alrededor de 340 °C, alcanzando su máxima descomposición entre 460 y 478 °C. El PET muestra la mayor resistencia, iniciando su degradación en torno a 377 °C y completándola en el rango de 484 a 593 °C [18].

6.5. Transferencia de calor

La transferencia de calor ocurre cuando hay una diferencia de temperatura entre dos cuerpos [19]. El flujo de energía térmica siempre va de la zona caliente hacia la más fría. En placas metálicas predomina la conducción. La ley de Fourier indica que el calor transferido depende del gradiente de temperatura, el área y la conductividad térmica del material.

El aluminio es un material ampliamente usado en aplicaciones térmicas por su alta conductividad, cercana a 236 W/m·K en estado puro [20]. Esta propiedad le permite distribuir el calor de forma uniforme en placas metálicas.

Cuando el aluminio se somete a ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento, mantiene estabilidad estructural y mecánica. Sin embargo, su coeficiente de expansión térmica, cercano a $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [21], puede provocar ligeras deformaciones dimensionales.

Las aleaciones de aluminio presentan variaciones en la conductividad térmica según su composición y tratamiento. Un ejemplo es la aleación 6061-T6, que combina buena resistencia mecánica con una conductividad cercana a 167 W/m·K [21]. Aunque este valor es menor que el del aluminio puro, la 6061-T6 ofrece mayor durabilidad frente a la fatiga térmica y estabilidad estructural, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones con ciclos térmicos consantes.

Para aprovechar estas propiedades del aluminio es necesario contar con un sistema que genere energía térmica confiable y estable. En este caso, la fuente térmica más adecuada se basa en resistencias eléctricas, cuya operación se explica a partir del efecto Joule.

Las resistencias eléctricas son dispositivos que convierten energía eléctrica en calor por efecto Joule. El principio establece que la potencia térmica liberada es proporcional al cuadrado de la corriente y a la resistencia del conductor [22]

$$P = I^2 \cdot R \tag{1}$$

Este fenómeno permite generar calor de forma precisa y controlada en aplicaciones industriales.

El diseño de una resistencia consiste en un alambre o filamento de alta resistividad, comúnmente fabricado con aleaciones como nicromo, embebido o protegido por materiales aislantes [23]. El calor se transfiere al entorno inmediato por conducción, convección o radiación, según la configuración.

Existen diferentes tipos de resistencias [24]. Las de cartucho se insertan en bloques metálicos y transmiten calor por conducción directa. Las de banda rodean superficies cilíndricas como tubos o barriles. Las planas o de mica permiten cubrir áreas más extensas con calentamiento uniforme. Las de espiral abierta, aunque menos comunes en equipos cerrados, ofrecen calentamiento rápido y directo del aire o de superficies expuestas. La elección depende de la geometría del sistema, la potencia requerida y la facilidad de control.

Figura 5. Resistencia eléctrica en espiral abierta



Nota. Resistencia en espiral de 2100 W a 208 V de 8 in de diámetro

Para que las resistencias funcionen de forma eficiente, es necesario instalarlas en un material que soporte altas temperaturas y dirija el calor hacia la zona de trabajo. En este contexto, los bloques cerámicos se convierten en un elemento clave.

Los bloques cerámicos aislantes JM-23 destacan por su baja densidad, alta porosidad y capacidad de operar hasta 1260 °C, lo que los hace adecuados para sistemas de resistencias eléctricas. Presentan una conductividad térmica de 0.17 W/m·K a 400 °C y 0.25 W/m·K a 1000 °C, garantizando una transferencia de calor controlada hacia la superficie metálica. Con una densidad aparente de 0.6 g/cm³ y una resistencia a la compresión de 1.2 MPa, ofrecen un balance entre ligereza y resistencia, lo que los convierte en un material confiable para aplicaciones de aislamiento térmico [25].

6.6. Control y ajuste de parámetros

Una vez definido el sistema que genere energía térmica con resistencias eléctricas, es necesario controlarlo de forma estable y segura. El control de temperatura asegura

Figura 6. Bloc cerámico JM23



Nota. Dimensiones de bloc cerámico 23 cm x 11.5 cm x 6.5 cm.

que el proceso de fundición se mantenga en los rangos adecuados. Esto evita la degradación del material o una fusión incompleta. Existen distintos tipos de controladores, desde los de encendido y apagado hasta los algoritmos PID. Entre ellos se encuentra el REX-C100, un equipo compacto y ampliamente usado en procesos térmicos.

El REX-C100 permite configurar parámetros de control PID. Entre ellos están la ganancia proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo. Estos valores definen la respuesta del sistema frente a cambios de temperatura. El equipo también incluye función de *autotuning*, que ajusta los parámetros de manera automática.

Este controlador acepta entradas de termocuplas tipo K y J, además de sensores RTD Pt100. El rango de medición para termocuplas tipo K es de 0 a 400 °C. La precisión es de $\pm 0.5\%$ F.S. ± 1 °C. Las salidas de control funcionan por relé y soportan cargas de hasta 250 V AC y 3 A [26].

El dispositivo tiene un formato compacto de 48×48 mm. Opera con una alimentación de 100–240 V AC. Incluye una pantalla digital que muestra la temperatura medida y el valor de consigna [26]. Estas características hacen del REX-C100 un equipo confiable para aplicaciones de laboratorio y procesos industriales a pequeña escala.

6.7. Presión y moldeado

Además del control de temperatura, es necesario considerar la presión como factor clave en la formación de los polímeros a reciclar. Ejemplos de este proceso de fabricación son el MDF, HDF y aglomerados.

Los tableros de fibras como MDF y HDF se fabrican a partir de fibras de madera finas que son sometidas a altas presiones y temperaturas. Durante el proceso se añaden resinas sintéticas que actúan como aglutinantes, logrando una estructura homogénea y estable con aplicaciones en mobiliario e interiores [27].

La aplicación de presión en la fabricación de tableros es fundamental para lograr

Figura 7. Kit de controlador PID REX C100



Nota. Controlador PID, relé de estado sólido con disipador de calor y termocupla tipo K.

la compactación del material. En el caso del MDF y HDF, la presión permite que las fibras de madera se unan con la resina de forma uniforme, reduciendo vacíos y aumentando la densidad del producto. En los tableros de partículas o aglomerado, la presión asegura la adhesión entre virutas y astillas, mejorando la cohesión interna. En ambos casos se obtiene un material más resistente, homogéneo y con mejores propiedades mecánicas [28] .

Con los procesos de fabricación de MDF, HDF y tableros aglomerados se observa la aplicación de presión como un factor clave para consolidar el material. De manera similar, la guía de Precious Plastic Academy recomienda el uso de un sistema hidráulico basado en un cilindro hidráulico manual. Este mecanismo convierte la fuerza manual en una presión elevada y controlada, gracias a la propiedad de los aceites de ser fluidos no comprimibles [29].

Al mantener control simultáneo de presión y temperatura, es posible fundir y compactar los polímeros, obteniendo planchas más homogéneas, con menor presencia de vacíos internos y mayor rigidez estructural.

6.8. Estructura metálica

El sistema que genera y controla la energía térmica requiere una estructura adecuada para su montaje. La estructura debe ser rígida para soportar el peso de los componentes y las cargas durante el prensado.

Los perfiles de acero presentan propiedades mecánicas adecuadas para resistir cargas, como la resistencia última a la tensión y el límite elástico. Además, su geometría estructural, cuando se combina con un diseño mecánico adecuado, permite soportar de forma eficiente los esfuerzos aplicados durante el prensado. De esta manera, la estructura metálica garantiza la transmisión segura de las fuerzas generadas por el triquet hidráulico.

Las estructuras metálicas requieren uniones confiables para garantizar la transmisión de cargas. Entre las uniones permanentes, la soldadura es una técnica ampliamente utilizada debido a su capacidad para generar enlaces continuos que soportan esfuerzos estáticos y dinámicos [30].

De manera complementaria, las uniones atornilladas o pernadas permiten el ensamblaje de componentes de forma desmontable, siendo efectivas frente a cargas de cortante, aplastamiento y precarga en los pernos [30].

Por otra parte, la geometría de los perfiles estructurales influye directamente en su rigidez. La teoría de vigas establece que las cargas aplicadas producen deflexiones que deben mantenerse dentro de límites aceptables para preservar la estabilidad y funcionalidad de la estructura. El análisis de deflexiones permite seleccionar perfiles adecuados y justificar que soportarán las fuerzas transmitidas por el triquet hidráulico [30].

7.1. Identificación de necesidades

El primer paso en el desarrollo del proyecto consistió en establecer las necesidades y restricciones del taller de reciclaje donde se implementará la máquina. Dicho taller aún no se encuentra construido, por esa razón no fue posible realizar mediciones físicas. En su lugar, se trabajó con la información disponible sobre las dimensiones previstas del espacio y con lineamientos proporcionados por el encargado del área.

Como herramienta metodológica se aplicó el proceso de *design thinking*, que permitió comprender los requerimientos de la máquina a partir de entrevistas y sesiones de trabajo con el responsable del futuro laboratorio. De este análisis se identificaron las siguientes condiciones principales:

- La máquina debe ocupar un área menor a un metro cuadrado.
- La estructura debe poder ingresar al taller ya ensamblada, considerando que la puerta tendrá un ancho equivalente a dos puertas tradicionales, aproximadamente 1.80 m.
- La altura de la máquina debe ser menor a dos metros.
- La máquina debe ser móvil para facilitar su ubicación dentro del espacio de trabajo.

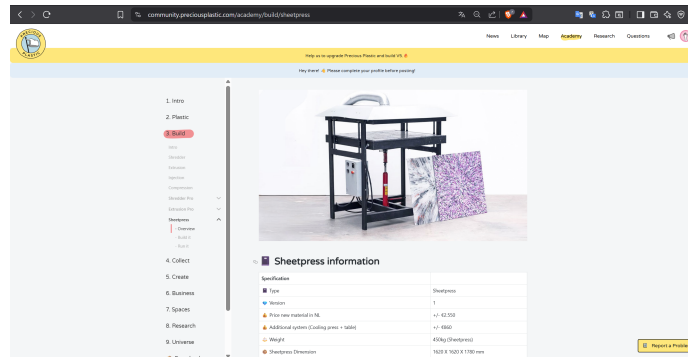
A partir de estas restricciones se elaboraron ideas y bocetos iniciales de la máquina tipo *sheetpress*, tomando en cuenta su futura integración al taller de reciclaje. En este

contexto, el “cliente” es la propia universidad, que busca implementar un espacio de reciclaje de plásticos inspirado en el movimiento Precious Plastic, con el propósito de transformar residuos en materia prima utilizable dentro de procesos de fabricación digital.

7.2. Adaptación de planos de Precious Plastic

Con las restricciones y requisitos previamente identificados se procedió a revisar la documentación compartida por el movimiento Precious Plastic. En su página oficial se encuentran planos abiertos, guías técnicas y videos de referencia que muestran los procesos de fabricación de la máquina *sheetpress*. A partir de estos documentos se identificaron los subsistemas principales: estructura metálica, sistema hidráulico y sistema de resistencias eléctricas.

Figura 8. Captura de pantalla del sitio web de Precious Plastic Academy



Nota. Página donde está la documentación, recomendaciones e información de plásticos para fabricar y utilizar las máquinas.

El análisis de esta información permitió definir las condiciones necesarias para fabricar la máquina y reconocer qué herramientas y procesos de manufactura serían viables en el contexto local. Además, se consultaron otras fuentes, como páginas web y videos de fabricantes independientes, con el fin de comparar variantes de diseño y obtener ideas para la adaptación.

La decisión final fue mantener la estructura propuesta por Precious Plastic, ajustando únicamente las dimensiones generales para cumplir con las restricciones del laboratorio académico. Sin embargo, se realizaron dos cambios clave en los componentes: las resistencias eléctricas y el cilindro hidráulico. El motivo principal de esta modificación fue la disponibilidad y el costo de los elementos en el mercado local.

En el caso de las resistencias, el diseño original proponía resistencias tipo cartucho. Un proveedor local ofrecía este componente a un costo superior a Q1,000 por unidad, en contraste con el valor estimado por Precious Plastic de aproximadamente 20 euros (Q178). Dado que se requerían alrededor de 50 unidades, el costo del sistema térmico

resultaba inviable. Como alternativa se optó por utilizar resistencias eléctricas de estufa, que permiten un calentamiento uniforme de las placas de aluminio con solo ocho unidades distribuidas estratégicamente dentro de la máquina.

7.3. Selección de materiales y componentes

La selección se basó en criterios funcionales, seguridad, disponibilidad local y costo.

7.3.1. Criterios de selección

- **Funcionalidad:** cumplir con presión, temperatura y rigidez requeridas.
- **Seguridad:** aislamiento térmico y protección eléctrica adecuados.
- **Disponibilidad local:** componentes comerciales en Guatemala.
- **Costo total:** adquisición, integración y operación.
- **Mantenimiento:** fácil reemplazo y acceso a repuestos.

7.3.2. Perfiles de acero para la estructura

Para el sistema de prensado se consideró una carga total de diseño de

$$F_{\text{total}} = 58.8 \text{ kN} \quad (2)$$

La estructura cuenta con dos vigas principales de perfil rectangular 2×4 in que comparten esta carga, por lo que la fuerza que actúa sobre cada viga es

$$F_{\text{viga}} = \frac{F_{\text{total}}}{2} = \frac{58.8 \text{ kN}}{2} = 29.4 \text{ kN} \quad (3)$$

La luz entre apoyos de cada viga se determinó como

$$L = 697.40 \text{ mm} \quad (4)$$

Dado que el sistema de prensado aplica la carga de forma prácticamente concentrada en la zona central, se modeló la acción sobre cada viga como una fuerza puntual F_{viga} aplicada en el centro del claro, a $L/2$ de cada apoyo. Para una viga simplemente apoyada con una carga puntual en el centro, el momento flector máximo viene dado por

$$M_{\text{max}} = \frac{F_{\text{viga}} L}{4} \quad (5)$$

Sustituyendo los valores de F_{viga} y L :

$$M_{\text{max}} = \frac{29.4 \times 10^3 \text{ N} \times 697.40 \text{ mm}}{4} \approx 5.13 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm} \quad (6)$$

Para la sección rectangular hueca equivalente de $100 \times 50 \times 3$ mm, aproximación del perfil 2×4 in orientado con la cara de 4 in en la dirección de la flexión, el módulo resistente elástico alrededor del eje fuerte es

$$Z_x \approx 20.9 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad (7)$$

La tensión máxima de flexión se calcula con la expresión clásica

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{Z_x} \quad (8)$$

Sustituyendo los valores de M_{max} y Z_x :

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{5.13 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}}{20.9 \times 10^3 \text{ mm}^3} \approx 2.45 \times 10^2 \text{ N/mm}^2 = 245 \text{ MPa} \quad (9)$$

Considerando un acero estructural con esfuerzo de fluencia mínimo

$$f_y \approx 315 \text{ MPa} \quad (10)$$

el factor de seguridad frente a fluencia es

$$n = \frac{f_y}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{315 \text{ MPa}}{245 \text{ MPa}} \approx 1.28 \quad (11)$$

Este resultado indica que la sección de perfil rectangular 2×4 in seleccionada para la zona crítica del marco trabaja dentro del rango elástico del material y cuenta con un margen de seguridad aceptable frente a la carga de diseño considerada.

7.3.3. Sistema térmico: resistencias eléctricas

Para el sistema de calentamiento de la planchas se seleccionaron resistencias tipo espiral comerciales, con una potencia nominal de 2100 W a 240 V. La elección de este modelo se basó principalmente en su disponibilidad en el mercado local, lo que facilita el reemplazo en caso de falla y reduce tiempos de espera. Además, la potencia unitaria de cada resistencia resulta adecuada para distribuir el calor en los cuatro sectores de la plancha, sin requerir elementos especiales o de difícil adquisición.

El sistema de calentamiento se compone de cuatro resistencias tipo espiral, cada una con una potencia nominal de

$$P_h = 2100 \text{ W} \quad (12)$$

diseñadas para operar a un voltaje de

$$V = 240 \text{ V}_{AC} \quad (13)$$

La corriente que circula por cada resistencia se obtiene a partir de la relación

$$P = VI \quad \Rightarrow \quad I = \frac{P}{V} \quad (14)$$

Sustituyendo los valores nominales:

$$I_h = \frac{P_h}{V} = \frac{2100 \text{ W}}{240 \text{ V}} \approx 8.75 \text{ A} \quad (15)$$

La resistencia eléctrica equivalente de cada elemento calefactor se estima como

$$R_h = \frac{V^2}{P_h} = \frac{(240 \text{ V})^2}{2100 \text{ W}} \approx 27.4 \Omega \quad (16)$$

Dado que las cuatro resistencias se conectan en paralelo, cada una recibe el mismo voltaje de 240 V y consume aproximadamente la misma corriente I_h . La potencia total instalada en la plancha es

$$P_{\text{total}} = 4P_h = 4 \times 2100 \text{ W} = 8400 \text{ W} \quad (17)$$

mientras que la corriente total demandada por el conjunto de resistencias es

$$I_{\text{total}} = 4I_h = 4 \times 8.75 \text{ A} \approx 35.0 \text{ A} \quad (18)$$

Estos valores permiten dimensionar adecuadamente la protección eléctrica y los conductores del circuito de potencia, así como justificar la potencia instalada para alcanzar las temperaturas de operación requeridas en la plancha de calentamiento.

De acuerdo con la ficha técnica del proveedor [21], Grupo Aluminor, el aluminio 6061 presenta un peso específico de 2.70 g/cm^3 , equivalente a una densidad de

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3 \quad (19)$$

Además, la aleación tiene un intervalo de fusión de aproximadamente $580 - 650 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo que la temperatura de trabajo de la máquina ($\sim 290 \text{ }^\circ\text{C}$) se mantiene por debajo del rango de fusión del material.

La plancha se fabricó en aluminio 6061-T6 con espesor de 3 mm y dimensiones aproximadas de $1.035 \text{ m} \times 0.694 \text{ m}$, por lo que su volumen es

$$V = 1.035 \text{ m} \times 0.694 \text{ m} \times 0.003 \text{ m} \approx 2.15 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (20)$$

Con la densidad indicada en la ficha técnica, la masa de la plancha se estima como

$$m = \rho V \approx 2700 \text{ kg/m}^3 \times 2.15 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \approx 5.8 \text{ kg} \quad (21)$$

El calor específico del aluminio se tomó como un valor de $c \approx 900 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Considerando un aumento de temperatura desde $25 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta $290 \text{ }^\circ\text{C}$, la variación de temperatura es

$$\Delta T = 290 - 25 = 265 \text{ C} \quad (22)$$

La energía necesaria para calentar la plancha es

$$Q = mc\Delta T \approx 5.8 \text{ kg} \times 900 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \times 265 \text{ C} \approx 1.39 \times 10^6 \text{ J} \quad (23)$$

La potencia total instalada en cada marco calefactor es de

$$P = 8400 \text{ W} \quad (24)$$

por lo que el tiempo teórico mínimo para alcanzar la temperatura objetivo, despreciando pérdidas de calor al ambiente y a la estructura, es

$$t = \frac{Q}{P} \approx \frac{1.39 \times 10^6 \text{ J}}{8400 \text{ W}} \approx 165 \text{ s} \approx 2.8 \text{ min} \quad (25)$$

En la práctica, se espera que el tiempo real de calentamiento sea mayor debido a pérdidas por convección, radiación y conducción hacia la estructura de soporte. Por este motivo, el valor calculado se interpreta como un límite teórico inferior, mientras que el tiempo de calentamiento observado experimentalmente sirve para ajustar y validar el diseño térmico del sistema.

7.3.4. Aislamiento y soportes térmicos

Para el sistema de calentamiento se seleccionaron dos materiales de aislamiento con funciones distintas: ladrillos refractarios tipo JM-23 y manta de fibra cerámica. Los ladrillos se utilizaron exclusivamente como soporte estructural para las resistencias, mientras que la fibra cerámica se empleó como material aislante para rellenar el resto del marco calefactor. De esta manera se logró un equilibrio entre rigidez, capacidad de aislamiento térmico y reducción de peso en cada módulo calefactor.

Los ladrillos JM-23 fueron maquinados para alojar cada resistencia espiral en una posición fija y segura dentro del marco.

Este material presenta baja densidad y una temperatura máxima de operación cercana a 1260 °C, lo que permite sostener las resistencias sin transmitir el calor directamente hacia la estructura metálica. Para cada resistencia se utilizaron tres bloques, distribuidos de forma que proporcionan soporte mecánico, separación térmica y estabilidad durante los ciclos de calentamiento.

El volumen restante del marco calefactor se rellenó con manta de fibra cerámica, seleccionada por su baja conductividad térmica, ligereza y resistencia a temperaturas superiores a 1200 °C. Su flexibilidad permite adaptarse a cavidades irregulares y eliminar puentes térmicos, mejorando el aislamiento general del sistema. La combinación de bloques refractarios para soporte y fibra cerámica como aislamiento complementario permitió obtener un módulo calefactor eficiente, ligero y adecuado para las temperaturas de operación de la máquina *sheetpress*.

7.3.5. Control y sensado de temperatura

El control se realizará con dos controladores PID REX-C100. Cada zona incluye un relé de estado sólido con disipador y una termocupla tipo K. Esta arquitectura permite control independiente por zonas, mejora la estabilidad térmica y simplifica el mantenimiento. La selección asegura compatibilidad con 220 V y con las resistencias especificadas.

El modelado de la máquina se realizó en el software Autodesk Inventor, tomando como base los requisitos de diseño previamente establecidos. El objetivo fue definir la estructura metálica de forma precisa, empleando perfiles seleccionados y asegurando el cumplimiento de las restricciones dimensionales identificadas.

En el proceso de diseño se utilizó el acelerador de estructuras de Inventor, lo que permitió ensamblar los perfiles con sus dimensiones reales y un aproximado a los materiales reales para establecer un modelo tridimensional de la máquina. Sobre este modelo se aplicaron herramientas de análisis por elementos finitos (FEA), con el fin de evaluar la deformación estructural bajo la carga máxima prevista del triquet hidráulico de 6 toneladas.

8.1. Modelado CAD

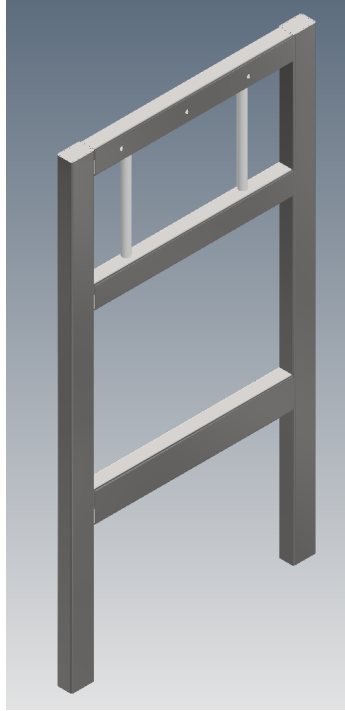
Para los marcos laterales se seleccionaron perfiles rectangulares de 2×3 in, con una separación de 1.15 m entre ambos y una altura de 1.5 m.

Los marcos superior e inferior se diseñaron con el mismo tipo de perfil (2×3 in), con longitudes de 1.15 m y un ancho transversal de 0.8 m.

La base de la máquina, destinada a soportar el triquet, se diseñó con perfiles de 2×4 in. Su geometría corresponde a un rectángulo de 1.15 m de largo por 0.8 m de ancho, reforzado en el centro por dos perfiles adicionales de 0.69 m de longitud. Este

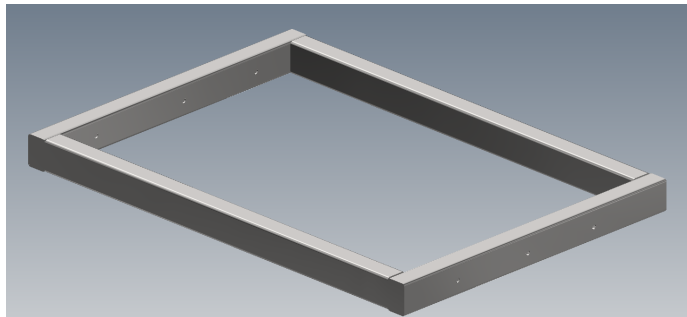
refuerzo asegura una adecuada distribución de esfuerzos en la zona donde se ejercerá la carga hidráulica.

Figura 9. Marco lateral



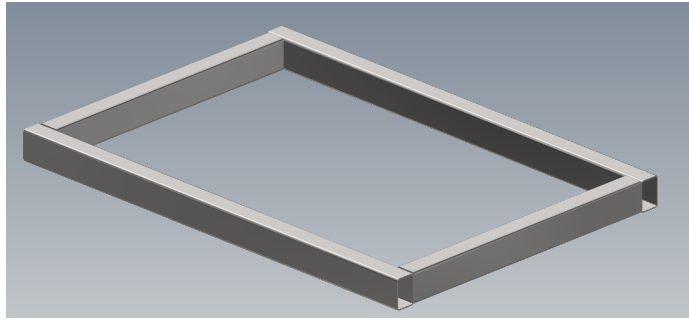
Nota. El marco lateral es una pieza que se utiliza dos veces, diseñada con perfiles 2×3 in.

Figura 10. Marco superior



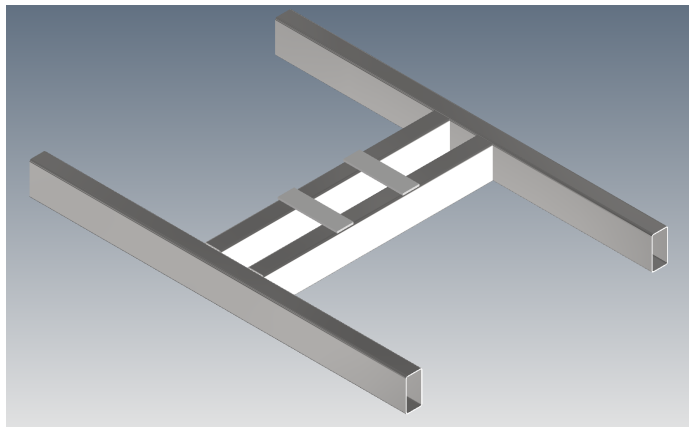
Nota. Este elemento se utiliza en la parte superior de la máquina y contiene resistencias eléctricas y bloques cerámicos, diseñado con perfiles 2×3 in.

Figura 11. Marco inferior



Nota. Este elemento se utiliza en la parte inferior de la máquina y contiene resistencias eléctricas y bloques cerámicos, diseñado con perfiles 2×3 in.

Figura 12. Base inferior

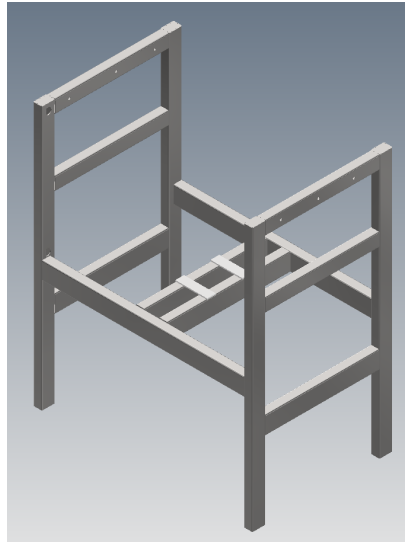


Nota. Este elemento se utiliza en la base de la máquina con el fin de soportar la fuerza que genera el sistema hidráulico, diseñado con perfiles 2×4 in.

En la Figura 9 se observa el marco lateral, diseñado para fabricarse mediante uniones soldadas en la mayoría de sus componentes al igual que los demás elementos de la máquina. En la parte superior se añadieron perforaciones que permiten su conexión con el marco superior (Ver Figura 10) mediante pernos. Esta decisión se tomó para facilitar el montaje y reducir posibles deformaciones que pueden presentarse durante el proceso de soldadura.

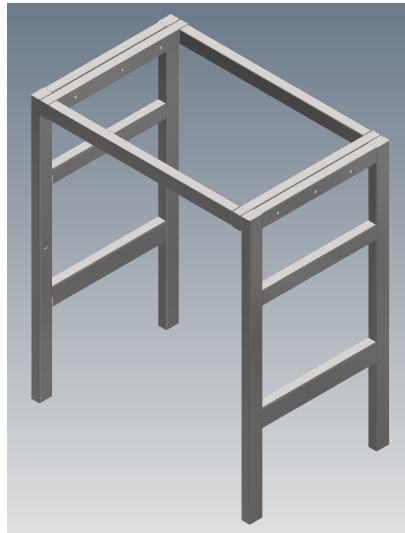
La unión entre la base inferior y los marcos laterales se planificó como permanente (ver Figura 13), utilizando soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido E6013 bajo el proceso SMAW. Sin embargo, para el marco superior se optó por uniones atornilladas (ver Figura 14), con el fin de garantizar precisión en el ensamble y permitir ajustes durante la fabricación.

Figura 13. Unión de la base con los marcos laterales



Nota. La figura ilustra los componentes que se unirán por medio de soldadura.

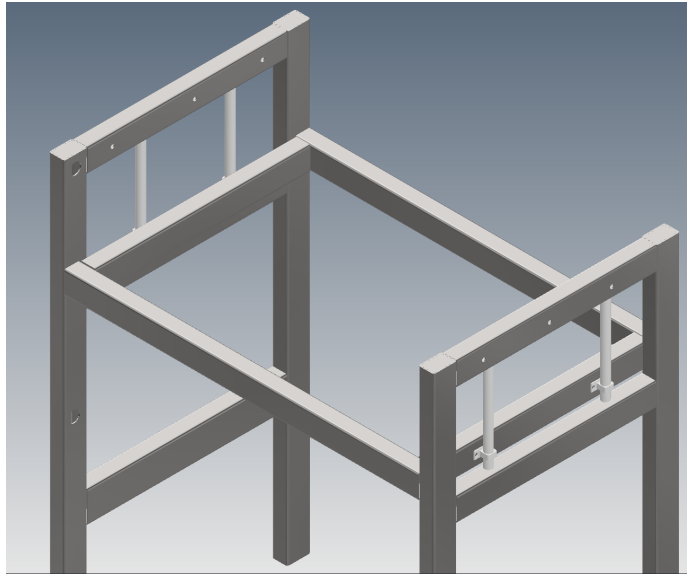
Figura 14. Unión de marcos laterales con marco superior



Nota. La figura ilustra los componentes que se unirán por medio de pernos.

El marco inferior (Figura 11) se diseñó sin perforaciones, ya que funcionará como un elemento móvil. Para ello se incluyeron perfiles redondos en los marcos laterales que actúan como guías, asegurando un recorrido lineal del conjunto (ver Figura 15).

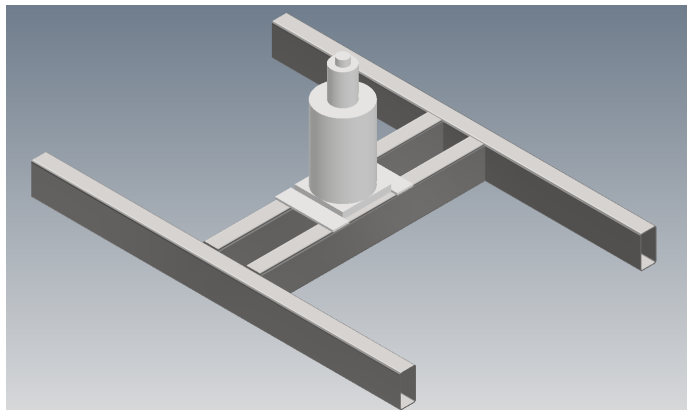
Figura 15. Unión de marcos laterales con marco inferior



Nota. La figura ilustra cómo se diseñó el ensamble entre el marco inferior con los marcos laterales utilizando guías.

Finalmente, en la base se incorporaron dos refuerzos internos (Figura 12) destinados a soportar y distribuir de forma uniforme la carga transmitida por el triquet hidráulico (Ver Figura 16). De esta manera, el diseño CAD refleja no solo la geometría general de la máquina, sino también las consideraciones prácticas para su fabricación y funcionamiento.

Figura 16. Base con triquet hidráulico instalado

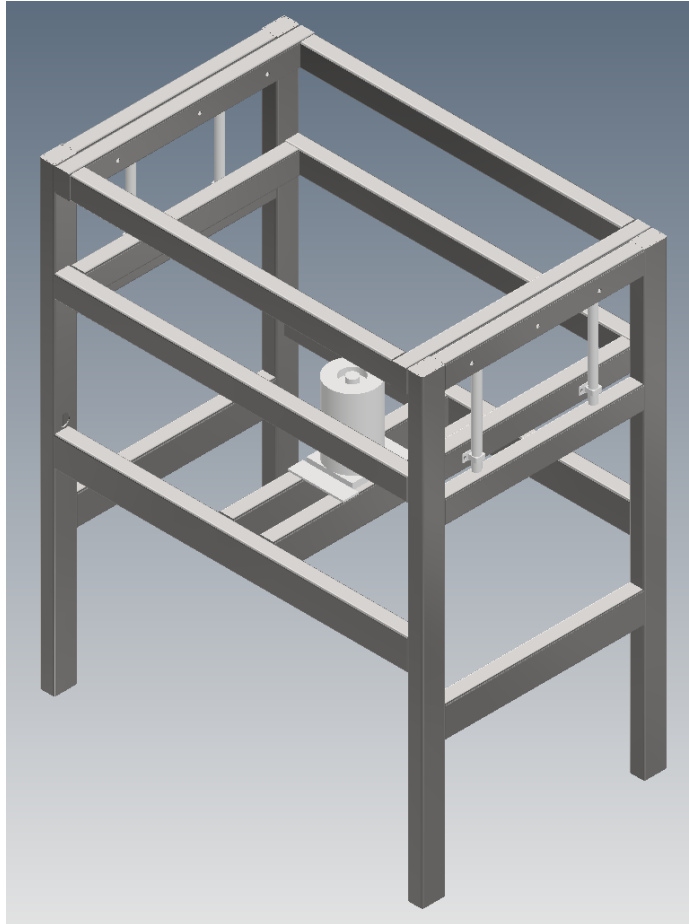


Nota. La figura ilustra el diseño que se contempló para soportar el triquet hidráulico sobre la base.

El modelo CAD de la estructura metálica muestra la integración de todos los elementos definidos en el diseño (ver Figura 17). En esta etapa, la propuesta se con-

centra en representar dimensiones, uniones y configuraciones que permitan evaluar la viabilidad de su fabricación y posterior ensamble.

Figura 17. Estructura metálica ensamblada



Nota. La figura ilustra el diseño completo de la estructura metálica.

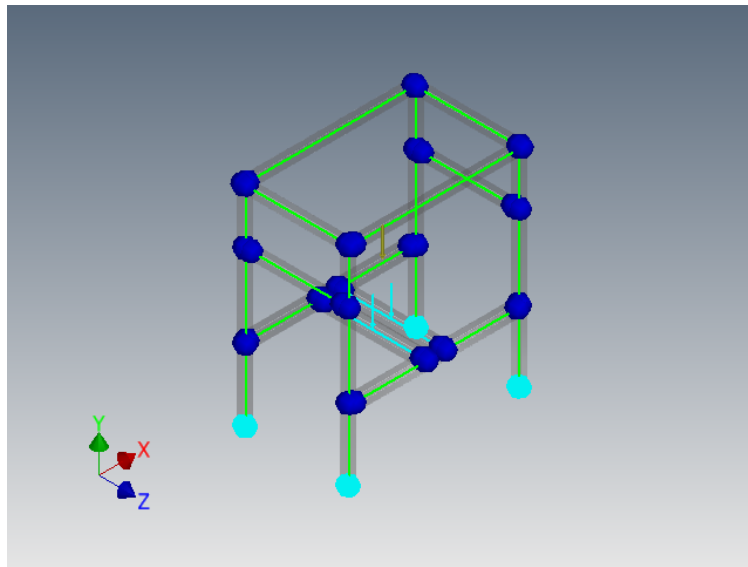
8.2. Simulaciones

En Autodesk Inventor se realizó un análisis de elementos finitos con el objetivo de identificar las deformaciones críticas en la estructura metálica bajo la máxima carga prevista. Para ello se aplicó una fuerza equivalente a la capacidad nominal del triquet hidráulico de 6 toneladas, considerada como la condición más exigente de operación. El modelo incluyó las propiedades de los perfiles seleccionados, sus dimensiones transversales y las longitudes de los tramos estructurales, de manera que la simulación reflejara con mayor fidelidad el comportamiento esperado durante el prensado.

8.2.1. Configuración del análisis

- Se definieron las propiedades del material de los perfiles de acero ASTM A53 con sección rectangular.
- Se aplicaron condiciones de carga equivalentes al prensado máximo.
- Las restricciones se establecieron en los puntos de apoyo de la base para simular el contacto con el suelo.

Figura 18. Modelo CAD con malla de elementos finitos aplicada



Nota. La figura ilustra la malla de elementos finitos aplicada a la estructura, los puntos donde se fijó la estructura, la carga aplicada dividida en los dos perfiles de la base.

8.2.2. Resultados principales

- **Tensiones normales (S_{max}):** se localizaron en los puntos de unión de la base con los marcos laterales, mostrando concentraciones en las zonas de soldadura y en las conexiones atornilladas.
- **Desplazamiento resultante:** el análisis indicó una ligera deformación en la parte superior de la estructura, manteniéndose dentro de valores aceptables para el material y el diseño.
- **Factor de seguridad:** el resultado obtenido confirma que la estructura conserva un margen adecuado frente a la carga aplicada, lo que respalda la validez del diseño preliminar.

Figura 19. Tensión normal máxima

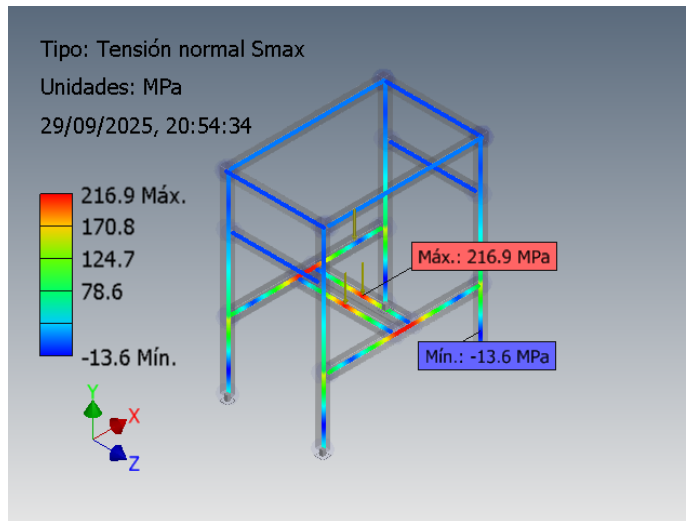
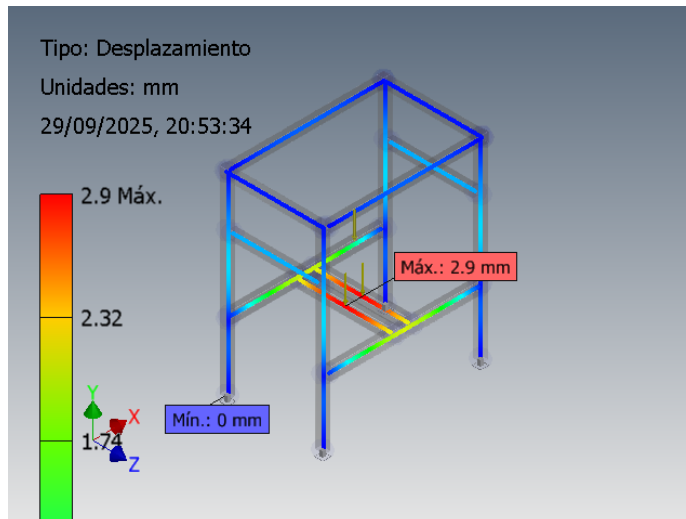


Figura 20. Gráfica del desplazamiento



8.2.3. Interpretación

Los resultados muestran que la estructura soporta de manera adecuada el esfuerzo máximo previsto en operación. Las tensiones normales se concentran en las uniones críticas, pero sin superar la capacidad del material (ver Figura 19). El desplazamiento resultante no compromete la estabilidad general (ver Figura 20).

Fabricación de la máquina

Toda la fase de fabricación de la máquina se llevó a cabo en el taller de fabricación digital del Centro de Capacitaciones MuniTec, ubicado en la zona 21 y conocido como Makerspace. Este espacio cuenta con el equipo, herramientas y medidas de seguridad necesarias para la construcción de prototipos y proyectos de manufactura digital. Tanto la fabricación como las pruebas iniciales de la máquina se realizaron en este laboratorio.

9.0.1. Construcción de la estructura metálica

La estructura metálica se construyó utilizando perfiles de acero previamente seleccionados. Para el corte de los perfiles se empleó una sierra circular especializada en corte de metales de la marca Milwaukee, modelo 6370-21 (Figura 21). Se efectuaron cortes rectos y cortes a 45° , verificando las medidas indicadas en los planos técnicos. Para mejorar la precisión se emplearon guías de corte elaboradas con perfiles en L de acero, escuadras rápidas y trazado previo de líneas guía sobre la superficie del perfil. Estas medidas permitieron reducir desviaciones y obtener cortes más uniformes.

Figura 21. Sierra eléctrica Milwaukee, modelo 6370-21



Figura 22. Proceso de corte en perfiles de acero



Durante el proceso se identificaron ligeras variaciones en la exactitud de los cortes angulados, producto de la operación manual de la herramienta. Como medida correctiva se reforzó el uso de guías metálicas, el marcado previo de cada elemento y la verificación doble de longitudes antes del corte. Estas acciones mejoraron el ajuste entre piezas durante el ensamblaje.

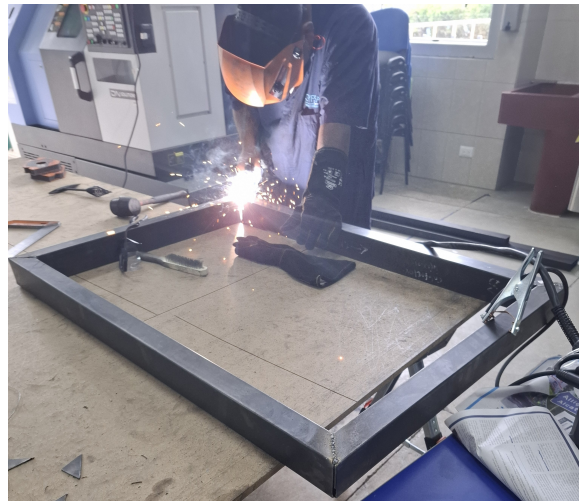
El ensamblaje de las piezas se realizó mediante soldadura, utilizando una máquina multiprocesos Wizard, modelo Infinity 160A (Figura 23), configurada para proceso SMAW, se empleó electrodo revestido E6013 de 3/32", adecuado para uniones en acero al carbono de bajo espesor, por su buena penetración y facilidad de limpieza del cordón.

Figura 23. Soldadora multiprocesos 160 A modelo Infinity 160 A



Durante el ensamblaje se presentaron problemas menores de alineación entre los marcos laterales y la base, los cuales se corrigieron mediante presión manual con prensas rápidas, escuadras magnéticas y control visual durante el proceso de soldadura. Posteriormente, las uniones fueron lijadas con una pulidora Bosch, obteniendo un mejor acabado superficial y eliminando irregularidades en el cordón de soldadura.

Figura 24. Proceso de soldadura en perfiles metálicos



Durante estas actividades se aplicaron las medidas de seguridad correspondientes mediante el uso de equipo de protección personal (Figura 25). Se utilizaron botas industriales con punta de policarbonato CAT, mangas anticorte Milwaukee nivel 5, guantes antiimpacto nivel 3 de la misma marca y casco protector Milwaukee con visor integrado de protección contra impactos.

Figura 25. EPP utilizado en el proceso de corte de perfiles metálicos y maquinado de bloques cerámicos



(a) EPP para realizar cortes en perfiles metálicos



(b) EPP para realizar el maquinado en bloques cerámicos

9.0.2. Preparación y montaje del aislamiento térmico

Los bloques cerámicos JM-23 utilizados como soporte de las resistencias fueron maquinados manualmente empleando un rauter de mano. Para generar las cavidades internas, se utilizaron diferentes tipos de fresas que permitieron realizar cortes, vaciados y perfiles internos con la geometría necesaria para alojar las resistencias espirales. Este proceso se aplicó a tres bloques por cada resistencia, distribuidos de forma que crearan el espacio exacto para su instalación y garantizaran un soporte estable dentro del marco calefactor (Figura 26).

Figura 26. Ladrillos JM-23 maquinados, resistencias eléctricas instaladas



El maquinado de los bloques fue un paso esencial para la correcta integración

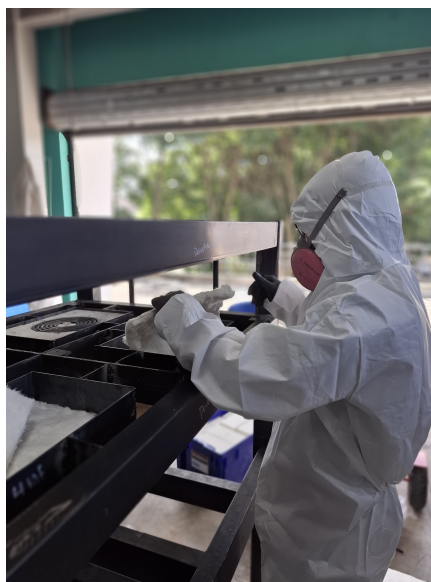
del sistema de calentamiento. Las cavidades generadas no solo permitieron fijar cada resistencia en una posición definida dentro del marco calefactor, sino que también evitaron desplazamientos durante la operación, incluso ante variaciones térmicas o vibraciones propias del manejo de la máquina (Figura 27). Además, la forma interna de los bloques contribuye a dirigir el calor hacia la plancha de aluminio, disminuyendo la transferencia hacia la estructura y mejorando la eficiencia térmica del sistema.

Figura 27. Bloques cerámicos con resistencias instaladas dentro del marco calefactor



Una vez que los bloques cerámicos JM-23 fueron instalados dentro del marco calefactor y las resistencias quedaron alojadas en sus cavidades correspondientes, fue necesario rellenar los espacios restantes para evitar pérdidas de calor y asegurar una adecuada transferencia térmica hacia las planchas de aluminio (Figura 28). Para este propósito se utilizó manta de fibra cerámica, la cual permitió cubrir todos los vacíos generados durante el montaje de los bloques refractarios.

Figura 28. Instalación de fibra cerámica en el marco calefactor



Durante el manejo de la fibra cerámica fue necesario utilizar equipo de protección personal especializado debido a la naturaleza del material (Figura 29). La fibra produce partículas finas que pueden resultar irritantes si se inhalan o entran en contacto directo con la piel. Por esta razón, se utilizó una mascarilla con filtro para partículas, un traje completo de plástico para evitar el contacto con la piel y guantes de látex desechables para proteger las manos durante el proceso de instalación. El uso adecuado de este EPP fue indispensable para garantizar la seguridad del operador y reducir riesgos durante la manipulación del aislamiento.

Figura 29. EPP requerido para el manejo de fibra cerámica



Una vez instalados los bloques cerámicos con las resistencias espirales en sus cavidades y rellenos los espacios restantes con fibra cerámica, se completó la integración del sistema de calentamiento en los dos marcos calefactores, superior e inferior. Cada marco quedó conformado por los tres elementos principales del aislamiento térmico: los bloques JM-23 que sostienen y fijan las resistencias, la fibra cerámica que rellena y aísla las cavidades internas, y las propias resistencias cerámicas encargadas de generar el calor (Figura 30). Esta configuración, combinada con la estructura metálica diseñada para encofrar los elementos térmicos y proporcionar rigidez al conjunto, permitió obtener un marco calefactor ligero, estable y sin posibilidad de desplazamiento de sus componentes durante la operación.

Figura 30. Vista final del marco calefactor inferior



9.1. Integración del sistema eléctrico y térmico

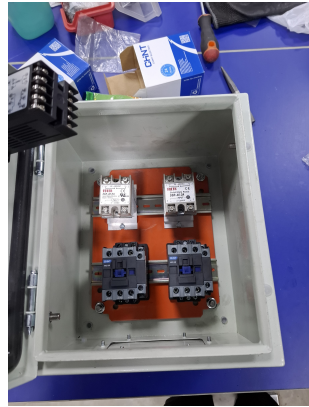
La selección del cableado eléctrico del sistema de calentamiento se realizó utilizando los valores obtenidos en las Ecuaciones 15 y 18, donde se determinó que cada resistencia consume aproximadamente 8.75 A y que cada marco calefactor requiere una corriente cercana a 35 A. Con base en estos valores y en los requisitos de seguridad del sistema, se definieron tres niveles de cableado con el objetivo de optimizar costos, facilitar la instalación y asegurar una operación confiable.

Para la línea de alimentación principal, encargada de suministrar energía simultáneamente a los dos marcos calefactores, superior e inferior, se seleccionó un conductor THHN calibre 6 del proveedor Viakón. Este cable soporta corrientes de hasta 75 A, valor adecuado considerando que la carga combinada de los dos marcos alcanza aproximadamente 70 A. La elección del calibre 6 garantiza un margen de seguridad suficiente y cumple con las capacidades de conducción requeridas para la máquina.

En la conexión individual hacia cada marco calefactor se utilizó conductor THHN calibre 8, cuya capacidad de corriente es de hasta 40 A. Este valor es adecuado considerando que cada marco demanda alrededor de 35 A, permitiendo una instalación más económica sin comprometer la seguridad ni la capacidad del circuito.

Finalmente, para la conexión directa entre las resistencias y el punto de distribución interna del marco se empleó cable con recubrimiento cerámico calibre 12. Esta selección fue necesaria debido a que esta sección del cableado está expuesta a temperaturas elevadas y requiere un aislamiento que resista condiciones térmicas severas para evitar la degradación o derretimiento del conductor. Desde la terminal cerámica —ya alejada del punto de mayor temperatura— hacia el resto del sistema, el cable cerámico se sustituyó por conductor THHN calibre 12, lo que permitió reducir costos sin comprometer la capacidad de corriente necesaria para cada resistencia.

Figura 31. Vista general de la caja eléctrica de la máquina



(a) Vista interna de la caja eléctrica



(b) Vista externa de la caja eléctrica

En el interior de la caja eléctrica se alojan los elementos encargados de controlar la activación del sistema de calentamiento (Figura 31). Para cada marco calefactor se instaló un relé de estado sólido modelo SSR-40DA y un contactor CHINT NXC-38, los cuales trabajan de manera conjunta para suministrar energía a las resistencias. Los relés SSR permiten la conmutación rápida y silenciosa de la señal de control proveniente del controlador PID, mientras que los contactores NXC-38 son los encargados de abrir y cerrar el circuito de potencia que alimenta a las resistencias con los 220 V de operación. Esta combinación ofrece un sistema confiable, con una capa adicional de protección eléctrica y una vida útil más larga debido a la ausencia de chispas en la etapa de conmutación.

Cada marco calefactor incorpora una termocupla tipo K instalada en el centro del módulo (Figura 32) , cuya señal es enviada directamente al controlador PID correspondiente. El PID utiliza esta información para comparar la temperatura real con el valor deseado programado en su interfaz. Cuando la temperatura medida se encuentra por debajo del punto de consigna, el PID activa su salida de alarma, la cual funciona como un interruptor normalmente abierto. Al cerrarse esta salida, se energizan las bobinas de los contactores NXC-38, permitiendo el paso del voltaje de 220 V hacia las resistencias cerámicas. Una vez que la temperatura alcanza el valor de consigna, el PID desactiva la alarma, los contactores se abren y se interrumpe la alimentación eléctrica, reiniciando el ciclo térmico cada vez que sea necesario para mantener un valor estable.

Figura 32. Termocupla instalada en el centro del marco calefactor



En la parte externa de la caja eléctrica se ubican los elementos de interacción y control directo para el operador (Figura 31). Estos incluyen dos controladores PID REX-C100, uno para el marco calefactor superior y otro para el inferior, un selector de encendido y apagado del sistema y un paro de emergencia de acción inmediata. Los controladores PID permiten ajustar la temperatura objetivo y visualizar la lectura en tiempo real proveniente de cada termocupla, facilitando la supervisión del proceso de calentamiento.

El selector de encendido actúa como el interruptor maestro del sistema, permitiendo energizar los circuitos de control internos únicamente cuando se encuentra en la posición de encendido. Su función es habilitar la alimentación de bajo voltaje que requieren los PIDs, SSR y bobinas de los contactores. Por su parte, el paro de emergencia se encuentra conectado en serie con el selector, de modo que su activación interrumpe de manera inmediata la alimentación a todos los elementos de control, sin importar el estado del selector o del PID. Esto garantiza que, ante cualquier condición insegura o falla inesperada, el operador pueda detener el proceso de forma inmediata, cortando la señal que activa los contactores y evitando el suministro de energía a las resistencias.

9.2. Integración del sistema hidráulico

El sistema hidráulico de la máquina se basa en un cilindro de 6 toneladas conectado a un acople maquinado en aluminio (Figura 33), encargado de generar la fuerza necesaria para el prensado. Este cilindro presenta una altura mínima de 21.5 cm y una altura máxima de 43.5 cm, valores que resultaban insuficientes para recorrer completamente la distancia requerida entre el marco calefactor inferior y el superior. Para compensar esta diferencia y asegurar el funcionamiento correcto del mecanismo, fue necesario fabricar una pieza cilíndrica de aluminio que se instaló entre el vástago del cilindro y la estructura móvil del marco calefactor inferior. Esta pieza cumple dos funciones principales: aumentar la altura máxima efectiva del cilindro y permitir un

acople adecuado entre la superficie plana del vástago y la geometría en forma de cruz de los refuerzos del marco inferior.

Figura 33. Integración del sistema hidráulico en la estructura



Con esta extensión instalada, el cilindro puede completar todo el recorrido vertical necesario para que el marco calefactor inferior ascienda siguiendo las guías laterales. Para facilitar esta integración, se diseñaron soportes y adaptadores impresos en 3D (Figura 34), lo que permitió iterar y adaptar cada pieza de forma rápida durante el proceso de ensamblaje.

Figura 34. Guías impresas laterales en PET



Estas piezas fueron fabricadas en PET, un material que soporta temperaturas de hasta 80 °C sin deformarse. A pesar de esta limitación térmica, las piezas nunca están expuestas directamente al calor del sistema de resistencias, ya que se encuentran ubicadas a los costados del marco calefactor. Gracias al aislamiento combinado de los bloques cerámicos y la fibra cerámica, se evita que el calor se transmita lateralmente hacia los soportes impresos, garantizando que mantengan su forma y rigidez durante la operación.

Esta integración permitió lograr un sistema hidráulico funcional, seguro y compatible con las dimensiones de la máquina, asegurando un acoplamiento adecuado entre el cilindro y el marco calefactor y permitiendo el desplazamiento vertical completo requerido para el prensado de las planchas.

9.3. Ensamblaje final

Una vez fabricadas las principales secciones de la máquina —el sistema hidráulico, la estructura metálica y los sistemas eléctrico y térmico— se inició el proceso de ensamblaje final (Figura 35). Este montaje no se realizó de manera lineal, sino que las distintas etapas se trabajaron en paralelo para avanzar en la construcción mientras se verificaba la compatibilidad entre componentes.

Figura 35. Estructura completa de la máquina ensamblada



Este enfoque permitió identificar problemas y desviaciones desde el inicio, especialmente en la estructura metálica, la cual presentó deformaciones causadas por el calor del proceso de soldadura. Estas irregularidades generaron variaciones en las dimensiones previstas, reduciendo o aumentando ligeramente el tamaño en áreas específicas que luego afectaban el ajuste del resto de los módulos.

Con las correcciones aplicadas durante el montaje, fue posible integrar progresivamente cada sistema y asegurar un acoplamiento adecuado entre los componentes. De esta manera se completó el ensamblaje final de la máquina, logrando una instalación estable, alineada y funcional.

Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento realizadas al prototipo de la máquina SheetPress, con el objetivo de verificar la operación inicial de los sistemas mecánico, térmico, eléctrico e hidráulico. Debido a que el prototipo se encuentra en una etapa temprana de construcción, las pruebas se enfocaron en validar la funcionalidad básica de cada subsistema y evaluar su integración durante el ensamblaje final. Se realizaron pruebas de lectura y control de temperatura, activación de contactores, movilidad del marco calefactor y comportamiento del sistema hidráulico durante el recorrido vertical. Los resultados obtenidos permitieron identificar ajustes necesarios, confirmar el correcto desempeño general del equipo y establecer las bases para futuras pruebas completas de calentamiento y prensado del material plástico reciclado.

10.1. Metodología de pruebas

Las pruebas se enfocaron en verificar el funcionamiento individual de cada sistema antes del ensamblaje completo. La primera prueba consistió en evaluar el sistema de control térmico, conectando el controlador PID a la termocupla tipo K instalada en su posición final dentro del marco calefactor. Se comprobó que el PID leyera correctamente la temperatura ambiente y respondiera de forma estable a los cambios de lectura.

Posteriormente, se probó la activación del sistema de potencia térmica. Para ello, se configuró en el PID una temperatura superior a la medida por la termocupla, verificando que la salida de alarma se activara y energizara los contactores correspondientes.

Esta prueba confirmó que la lógica de control —termocupla–PID–SSR–contactor— funcionaba según lo previsto.

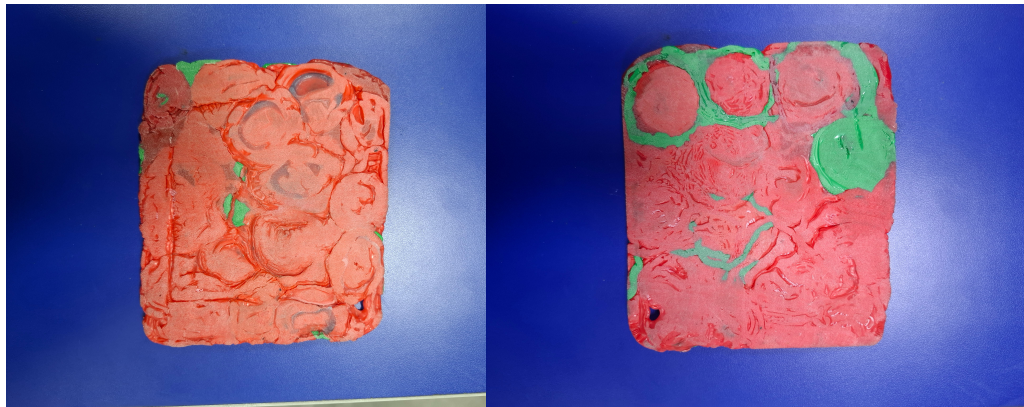
La tercera etapa consistió en evaluar la movilidad del marco calefactor inferior mediante la activación del cilindro hidráulico. Durante las pruebas se identificó un pequeño desnivel en el recorrido, especialmente en la fase inicial de ascenso.

No obstante, una vez instalados los bloques cerámicos, las resistencias y la fibra cerámica, el peso total del conjunto permitió regular y estabilizar el nivel del marco. Además, el acople maquinado en aluminio facilitó completar el recorrido vertical desde la altura mínima hasta la máxima requerida.

Además de las pruebas eléctricas, térmicas y mecánicas, se realizaron pruebas iniciales de fusión de plástico reciclado para evaluar la capacidad del sistema térmico.

Para estas pruebas se utilizaron tapaderas de botellas de gaseosas y jugos, las cuales fueron previamente limpiadas para eliminar impurezas y residuos que pudieran generar escoria o afectar la calidad de la plancha final. La primera prueba consistió en la elaboración de una placa de 10 cm × 10 cm, para lo cual se energizó únicamente la mitad de las resistencias en ambos marcos calefactores —superior e inferior— con el objetivo de limitar el área activa y evaluar el comportamiento térmico en una región controlada. Esta prueba permitió observar el proceso inicial de fusión y la respuesta térmica de los materiales reciclados bajo un ciclo de calentamiento reducido.

Figura 36. Prueba de fundición de material plástico



(a) Superficie superior del material fundido

(b) Superficie inferior del material fundido

10.2. Evaluación de resultados

El movimiento del marco calefactor inferior mostró una mejora notable después de aplicar grafito en polvo sobre las guías laterales. El desplazamiento se volvió más

suave y uniforme, especialmente durante la fase de descenso. Para mantener este comportamiento, será necesario aplicar grafito de forma periódica, idealmente una vez por semana o según la frecuencia de uso de la máquina.

En cuanto a la prueba de fundición de plástico, los resultados fueron satisfactorios para una primera etapa. Se logró una adecuada fusión del material y una buena adherencia entre las tapaderas de PP utilizadas como materia prima. La plancha final no obtuvo una superficie completamente plana ni homogénea (Figura 36), pero el proceso demostró que el sistema térmico es capaz de unir el material de manera consistente.

El espesor de la plancha mostró ligeras variaciones, con valores puntuales entre 3.3 mm y 2.9 mm. A pesar de estas diferencias, el espesor promedio coincidió con el objetivo de 3 mm, lo cual es un resultado positivo considerando las condiciones y el tamaño reducido de la prueba.

No se realizaron pruebas mecánicas estandarizadas, pero se aplicó una carga manual de flexión a la plancha fabricada. La pieza no se fracturó ni mostró fallas visibles, indicando una fusión adecuada del material, incluso cuando su textura no era completamente homogénea.

El tiempo total requerido para fabricar la plancha fue de aproximadamente un minuto de precalentamiento y un minuto de fusión y prensado. A una temperatura de operación cercana a 280 °C, se logró una fusión efectiva del material plástico, confirmando que las resistencias y el sistema térmico cumplen con los requerimientos para trabajar con PP reciclado.

La combinación del tiempo de precalentamiento y prensado permitió identificar un rango de operación inicial adecuado para el material utilizado. Aunque no se contó con instrumentación adicional para medir la distribución de temperatura o la presión aplicada, las observaciones realizadas durante las pruebas indican que la máquina puede generar las condiciones mínimas necesarias para producir planchas de plástico reciclado con una cohesión interna aceptable. Estos resultados sirven como referencia para futuras iteraciones, en las que será posible incorporar mediciones más detalladas de temperatura, espesor y calidad superficial.

10.3. Ajustes y mejoras técnicas

El tiempo total de proceso empleado en la prueba de la plancha de 10 cm × 10 cm, compuesto por un minuto de precalentamiento y un minuto de fusión y prensado, se consideró adecuado para lograr la fundición del material. Sin embargo, fue necesario realizar ajustes en la altura efectiva del cilindro hidráulico y en el acople maquinado en aluminio para asegurar que el marco calefactor inferior alcanzara la posición de prensado correcta. Estos ajustes permitieron obtener una plancha con un espesor ligeramente uniforme, lo que indica que una calibración más fina del recorrido puede mejorar todavía más la homogeneidad del espesor.

Durante las pruebas se utilizó únicamente la mitad de las resistencias instaladas en cada marco calefactor, lo que limitó el área activa de calentamiento a la región donde se ubicó la probeta de 10 cm × 10 cm. Para planchas de mayor tamaño, se recomienda aprovechar la totalidad del área calefactora, energizando todas las resistencias y manteniendo el mismo tiempo y temperatura de operación. Bajo estas condiciones, se espera que el material pueda fundirse de manera similar, siempre que se controle adecuadamente el cierre del sistema hidráulico y la distribución de la presión sobre la superficie de la plancha.

Un aspecto técnico relevante identificado en esta etapa es la sensibilidad del espesor final de la plancha a la alineación y al recorrido del sistema hidráulico. Pequeñas variaciones en la altura final de cierre pueden traducirse en diferencias de décimas de milímetro en el espesor del producto.

Además, resultaría conveniente complementar las próximas pruebas con mediciones sistemáticas de espesor en varios puntos de la plancha y, de ser posible, con la instalación de una segunda termocupla en otra zona del área de prensado.

Esto permitiría evaluar mejor la uniformidad térmica y correlacionar los parámetros de tiempo y temperatura con la calidad final del producto. Estos ajustes y mejoras técnicas constituyen la base para una siguiente iteración del diseño, orientada a obtener planchas con mayor uniformidad de espesor y una distribución de temperatura más homogénea.

Durante la extracción de la plancha al finalizar el proceso de fusión y prensado fue necesario aplicar un manejo cuidadoso debido a la alta temperatura del material. Se utilizaron guantes térmicos para proteger las manos y una varilla metálica para empujar la plancha fuera de la zona de mayor calor dentro de la máquina, desplazándola primero hacia el área donde las resistencias ya no estaban en funcionamiento.

Posteriormente, se continuó empujando la plancha con la varilla hasta sacarla completamente de la máquina y colocarla sobre una mesa de trabajo. Para mantenerla plana durante el enfriamiento se colocó peso adicional sobre su superficie, mientras que un ventilador doméstico generó una ligera corriente de aire para acelerar el enfriamiento sin provocar cambios bruscos de temperatura.

Con este procedimiento, la plancha tardó aproximadamente medio minuto en alcanzar una condición manejable; aún se encontraba caliente, pero podía ser manipulada con el apoyo de los guantes térmicos sin presentar riesgos significativos para el operador.

- Las pruebas demostraron que las resistencias eléctricas tipo estufa son capaces de alcanzar las temperaturas necesarias para fundir plástico reciclado, siempre que su operación se controle mediante un sistema de regulación térmica como un controlador PID con sensor de temperatura.
- El diseño mecánico desarrollado demostró ser estructuralmente adecuado, ya que la configuración del marco y los refuerzos permitió soportar la carga aplicada por el sistema hidráulico de 6 toneladas sin comprometer la integridad del conjunto.
- El sistema térmico, basado en placas conductoras de aluminio, permitió una distribución de calor efectiva en el área de prensado, favoreciendo la fusión uniforme del material plástico durante las pruebas realizadas.
- La integración del sistema hidráulico con el marco calefactor permitió obtener un mecanismo estable y seguro, capaz de generar el recorrido vertical necesario para la compactación del material. La adaptación mediante piezas maquinadas y componentes impresos en 3D demostró ser funcional y compatible con las guías laterales diseñadas para la máquina.
- La construcción modular de la máquina, basada en materiales y procesos accesibles localmente, permitió ensamblar y ajustar los componentes térmicos, eléctricos e hidráulicos de forma progresiva. Esta característica facilita futuras mejoras, mantenimiento y adaptaciones, cumpliendo con el objetivo de diseñar un equipo replicable y adecuado para entornos de fabricación con recursos limitados.

- Durante el proceso de fabricación se identificaron dificultades en la precisión de los cortes de los perfiles, especialmente en aquellos realizados a 45° . Estos errores generaron espacios que requirieron un mayor uso de soldadura para compensar las uniones.
- Se recomienda la implementación de herramientas de medición y marcado más precisas, como escuadras de inglete y calibradores digitales, que permitan asegurar la exactitud de los ángulos antes del corte.
- Asimismo, es aconsejable emplear equipos de corte con guías o sierras de banco diseñadas para metales, ya que ofrecen mayor estabilidad y reducen la variabilidad al realizar cortes repetitivos. Estas mejoras en los procesos de marcado y corte contribuirán a obtener uniones más exactas, con menor necesidad de material de aporte y mayor calidad estructural en el ensamblaje.
- Se recomienda evaluar un aumento en el espesor de la lámina de aluminio utilizada en las placas calefactoras. Un espesor mayor puede mejorar la rigidez del conjunto y ayudar a obtener planchas de plástico con mejor planicidad y resistencia.
- Se sugiere sustituir los componentes impresos en PET utilizados como guías laterales por materiales autolubricantes o por sistemas de rodamiento lineal. Esto permitiría reducir el desgaste y mejorar la precisión del movimiento vertical del marco calefactor.
- Es recomendable implementar una forma de regular la potencia entregada a las resistencias en lugar de operarlas al 100 % de capacidad. Un control más preciso de potencia favorecería una mejor estabilidad térmica y una mayor eficiencia energética.

-
-
- [1] Dave Hakkens, *Precious Plastic – Open source plastic recycling project*, Accedido el 10 de marzo de 2025, 2013. dirección: <https://preciousplastic.com>.
 - [2] Precious Plastic, *Sheetpress - Academy - Precious Plastic*, Accedido el 20 de marzo de 2025, 2023. dirección: <https://community.preciousplastic.com/academy/build/sheetpress>.
 - [3] Precious Plastic, *Sheetpress - Machine Overview*, <https://bazar.preciousplastic.com/machines/sheetpress/>, Accedido: 29 de abril de 2025, 2023.
 - [4] S. He y H. Rahemi, «Affordable and Localized Plastic Sheet Press Machine for Sustainable Manufacturing,» en *ASEE Annual Conference and Exposition*, Accedido el 30 de marzo de 2025, 2020, págs. 1-11. dirección: <https://peer.asee.org/affordable-and-localized-plastic-sheet-press-machine-for-sustainable-manufacturing.pdf>.
 - [5] Precious Plastic Monash, *Precious Plastic Monash*, Accedido el 25 de marzo de 2025, 2018. dirección: <https://www.preciousplasticmonash.com/>.
 - [6] Polyvora, *Desktop Sheetpress: 20"*, Accedido el 30 de marzo de 2025, 2025. dirección: <https://polyvora.io/products/desktop-sheetpress-20>.
 - [7] Mattia Bernini, *Precious Plastic Impact Report 2023*, Accedido el 30 de marzo de 2025, 2023. dirección: <https://www.preciousplastic.com/impact/2023>.
 - [8] F. W. Billmeyer, *Textbook of polymer science*. New York, Estados Unidos: Wiley, 1984, ISBN: 0-471-03196-8.
 - [9] A. G. Suárez, «Polímeros,» *Educación Química*, vol. 6, 2 2018, ISSN: 0187-893X. DOI: 10.22201/fq.18708404e.1995.2.66717.
 - [10] G. Satchanska, S. Davidova y P. D. Petrov, «Natural and Synthetic Polymers for Biomedical and Environmental Applications,» *Polymers*, vol. 16, n.º 8, pág. 1159, 2024. DOI: 10.3390/polym16081159. dirección: <https://doi.org/10.3390/polym16081159>.

- [11] S. D. Namnidi, L. C. van Breemen y S. F. Looijmans, «Structure-property relations in PP/HDPE blends: From processing to performance,» *Polymer*, vol. 323, pág. 128 150, 2025, ISSN: 0032-3861. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128150>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386125001363>.
- [12] T. Muringayil Joseph et al., «Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review,» *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, pág. 100 673, 2024, ISSN: 2666-0164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100673>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016424000677>.
- [13] MatWeb, LLC, *Polypropylene (PP) – Material Data Sheet*, <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=08fb0f47ef7e454fbf7092517b2264b2>, Accedido: 22 de septiembre de 2025, 2025.
- [14] MatWeb, LLC, *High Density Polyethylene (HDPE) – Material Data Sheet*, <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fce23f90005d4fbe8e12a1bce53ebdc8>, Accedido: 22 de septiembre de 2025, 2025.
- [15] MatWeb, LLC, *Polyethylene Terephthalate (PET) – Material Data Sheet*, <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=dd853b4106ed405294583cb4978451c6&ckck=1>, Accedido: 22 de septiembre de 2025, 2025.
- [16] X. Jiang y B. Bateer, «A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation,» *Waste Management & Research*, vol. 43, n.º 8, págs. 1159-1178, 2025, Epub 2025 Jan 18. DOI: 10.1177/0734242X241310658.
- [17] Z. Schyns y M. P. Shaver, «Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review,» *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 41, n.º 7, pág. 2 000 415, 2020. DOI: 10.1002/marc.202000415. dirección: <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>.
- [18] D. Mentés et al., «Combustion behaviour of plastic waste – A case study of PP, HDPE, PET, and mixed PES-EL,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 402, pág. 136 850, 2023, ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136850>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623010089>.
- [19] J. H. L. IV y J. H. L. V, *A Heat Transfer Textbook*, 5.ª ed. Mineola, New York: Dover Publications, 2019, Versión digital gratuita disponible en MIT OpenCourseWare. dirección: <https://ahtt.mit.edu/>.
- [20] P. Manufacturers. «Thermal Conductivity of Aluminum, Aluminum Grades and Alternative Choices.» Accedido: 25 septiembre 2025. dirección: <https://www.partmfg.com/thermal-conductivity-of-aluminum-aluminum-grades-and-alternative-choices/>.
- [21] G. Aluminos, *Ficha técnica Aleación 6061 Aluminio-Magnesio-Silicio*, Documento técnico de proveedor, Disponible en Grupo Aluminos, Guatemala, 2025.
- [22] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, 6.ª ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020, ISBN: 978-1-260-25230-5.
- [23] R. H. Perry y D. W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8.ª ed. New York: McGraw-Hill Education, 2007, Ver Sección 10-5: Electrical Heating, sobre materiales resistivos (ej. nicromo) y transferencia de calor por conducción, convección y radiación., ISBN: 978-0071422949.

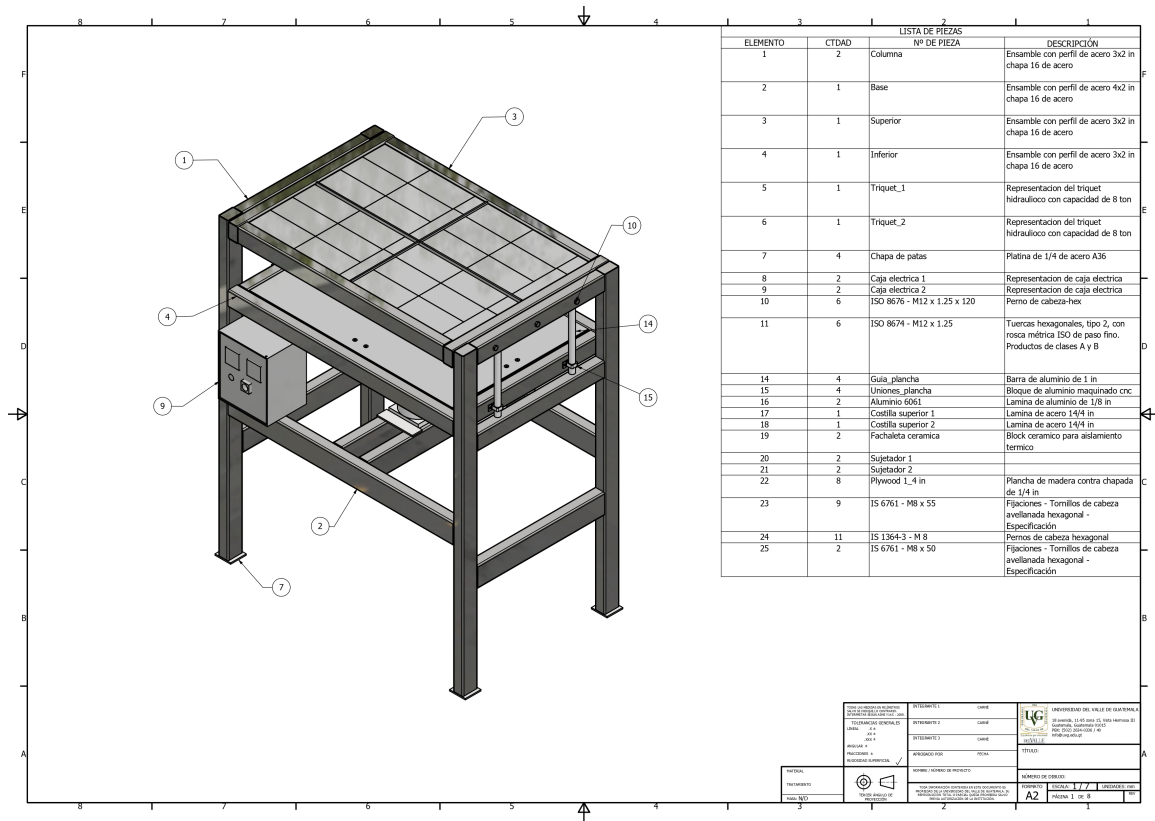
- [24] Termoresiste. «Resistencias tubulares a la medida.» Catálogo técnico del fabricante: incluye resistencias tipo cartucho, banda, planas y a la medida. dirección: <https://termoresiste.com/producto/resistencias-tubulares-a-la-medida/>.
- [25] Thermal Ceramics, *TDS Insulating Brick JM-23*, <https://www.morganthermalceramics.com/media/9354/tds-insulating-brick-jm-23.pdf>, Ficha técnica del ladrillo aislante JM-23. Consultado en 2025, 2023.
- [26] R. I. Inc., *Instruction Manual: REX-C100 Digital Temperature Controller*, Disponible en línea. Consultado el 25 de septiembre de 2025, RKC Instrument Inc., 2019. dirección: <https://www.rkcinst.co.jp/english/downloads/8933/imnzc22e1/>.
- [27] Processing Wood. «Proceso de fabricación de tableros MDF y HDF.» Accedido: 25 septiembre 2025. dirección: <https://processing-wood.com/es/procesos-de-fabricacion/tableros/mdf#bruto>.
- [28] Processing Wood. «Proceso de fabricación de tableros de partículas (aglomerado).» Accedido: 25 septiembre 2025. dirección: <https://processing-wood.com/es/procesos-de-fabricacion/tableros/viruta#bruto>.
- [29] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Mecánica de Fluidos*, 4.^a ed. México: McGraw-Hill Education, 2018, ISBN: 9781456261106.
- [30] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 11.^a ed. México: McGraw-Hill Education, 2020, ISBN: 9781456261106.

CAPÍTULO 14

Anexos

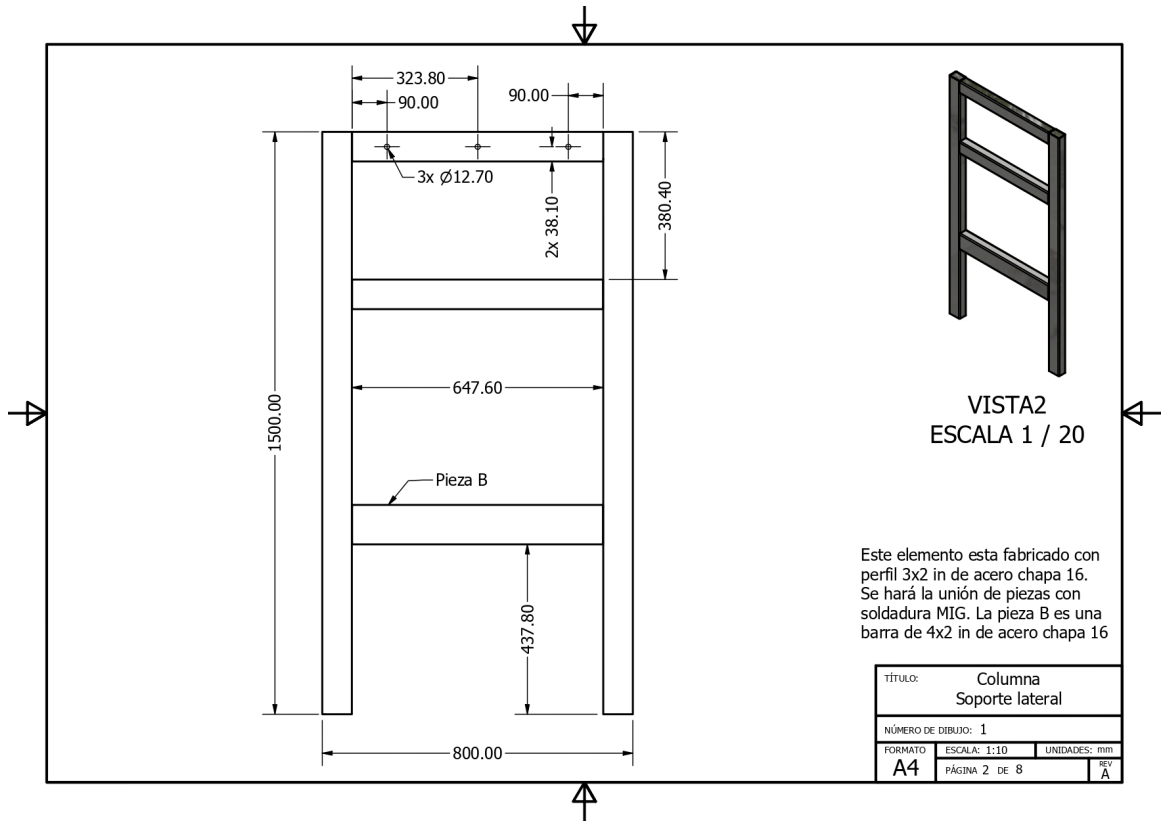
En este capítulo se incluyen las páginas del archivo PDF correspondiente a los planos de fabricación de la máquina *sheetpress*.

Figura 37. Plano de fabricación



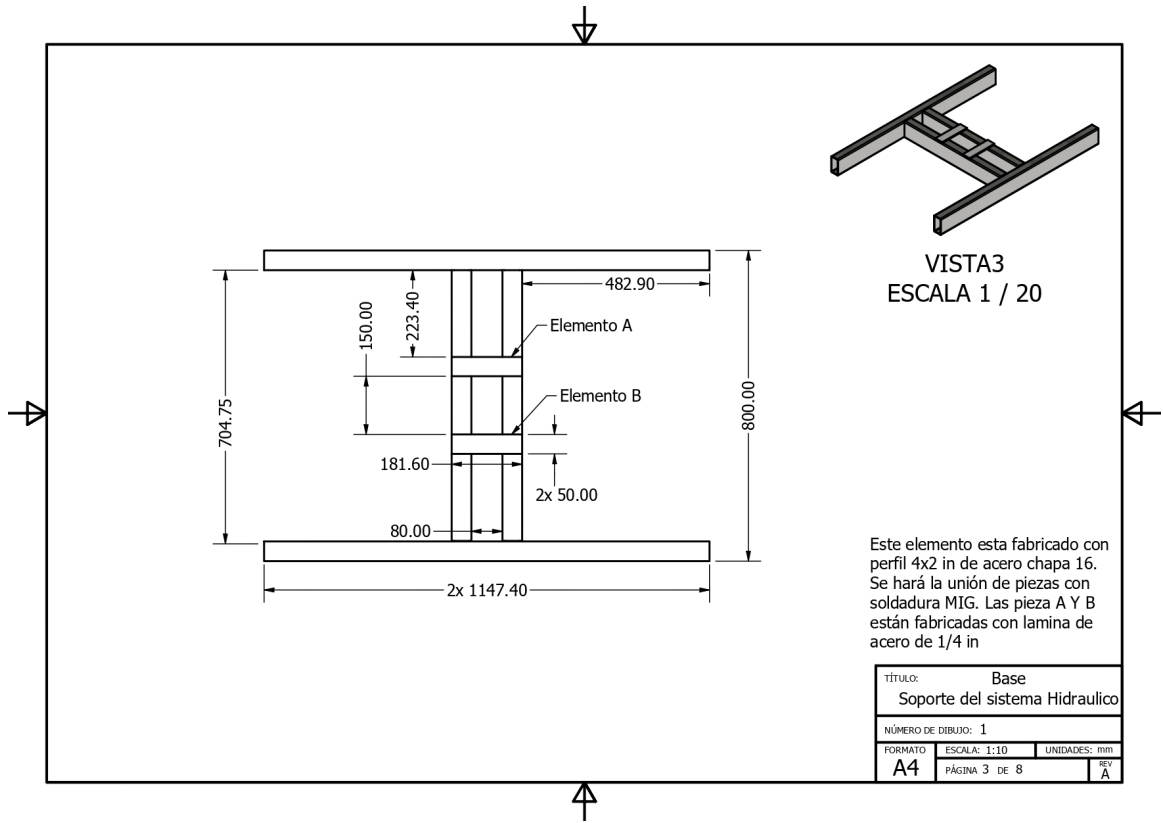
Nota. Plano 1 - Juego de planos de fabricación. Elaboración propia.

Figura 38. Plano de fabricación



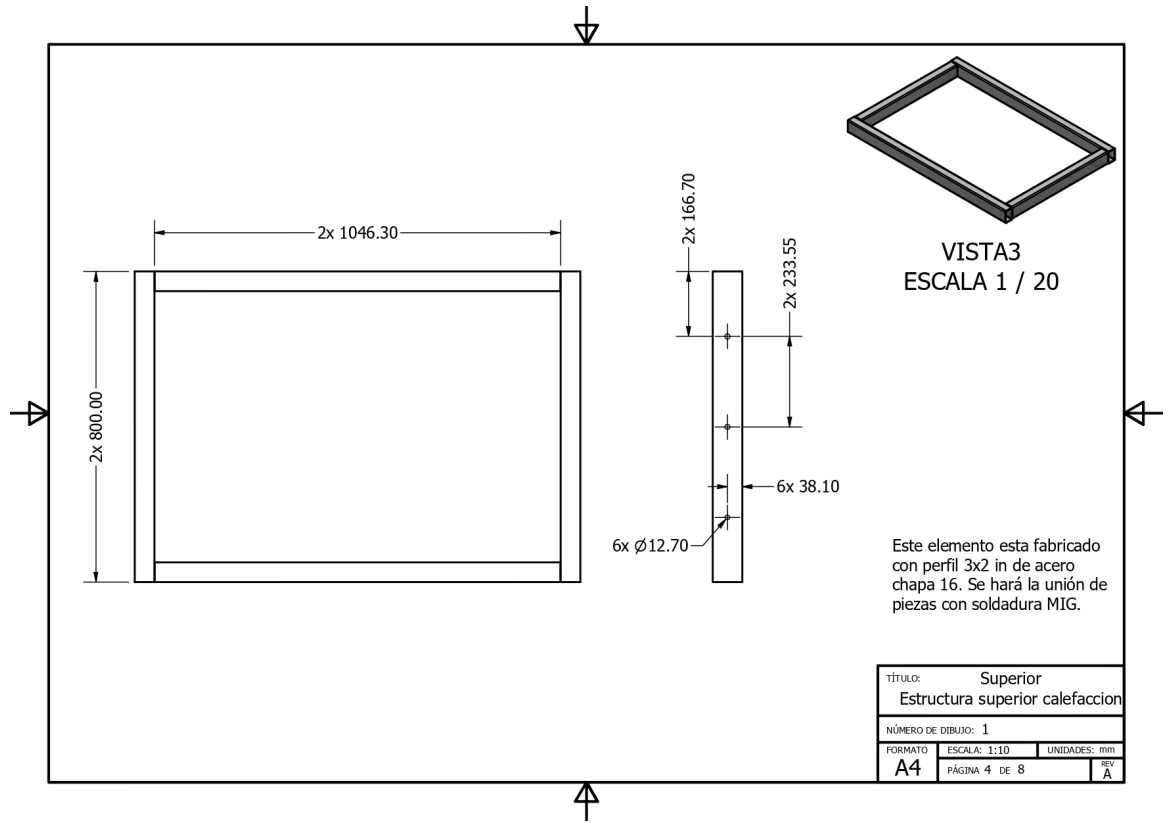
Nota. Plano 2 - Juego de planos de fabricación. Elaboración propia.

Figura 39. Plano de fabricación



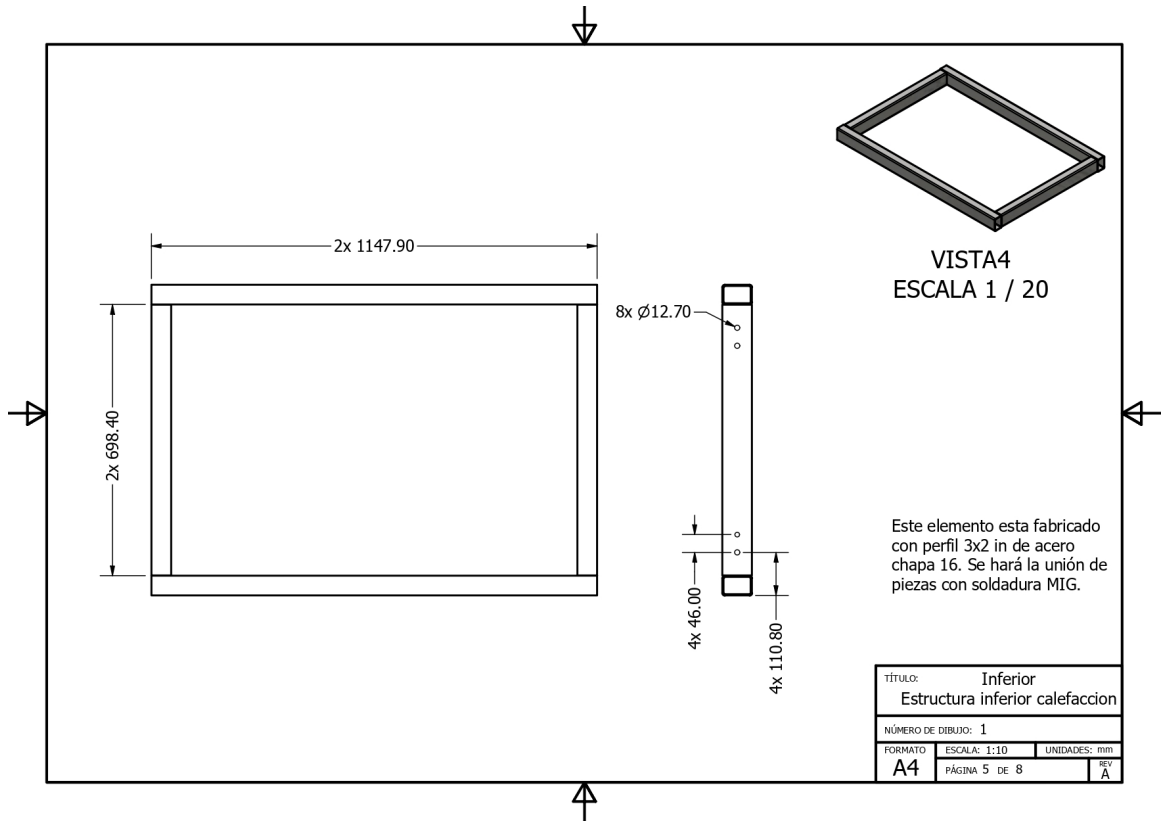
Nota. Pagina 3 - Juego de planos de fabricación. Elaboración propia.

Figura 40. Plano de fabricación



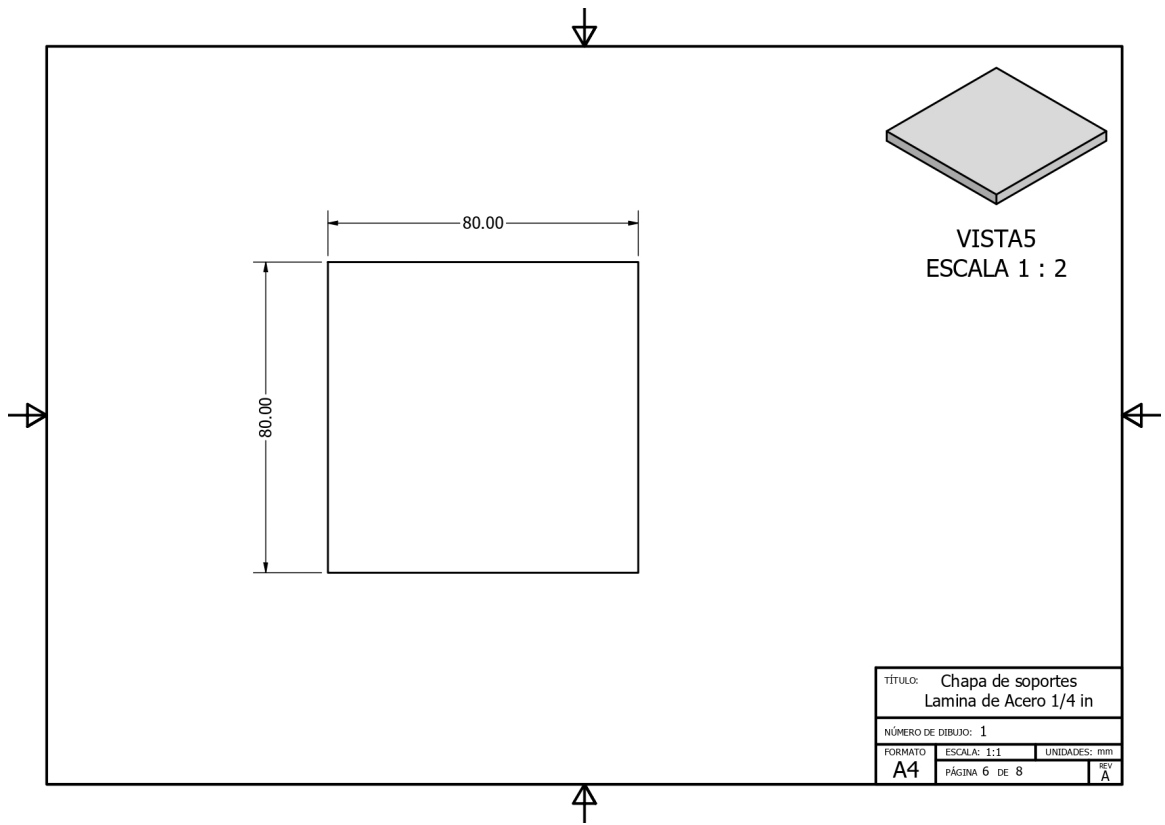
Nota. Pagina 4 - Juego de planos de fabricación. Elaboración propia.

Figura 41. Plano de fabricación



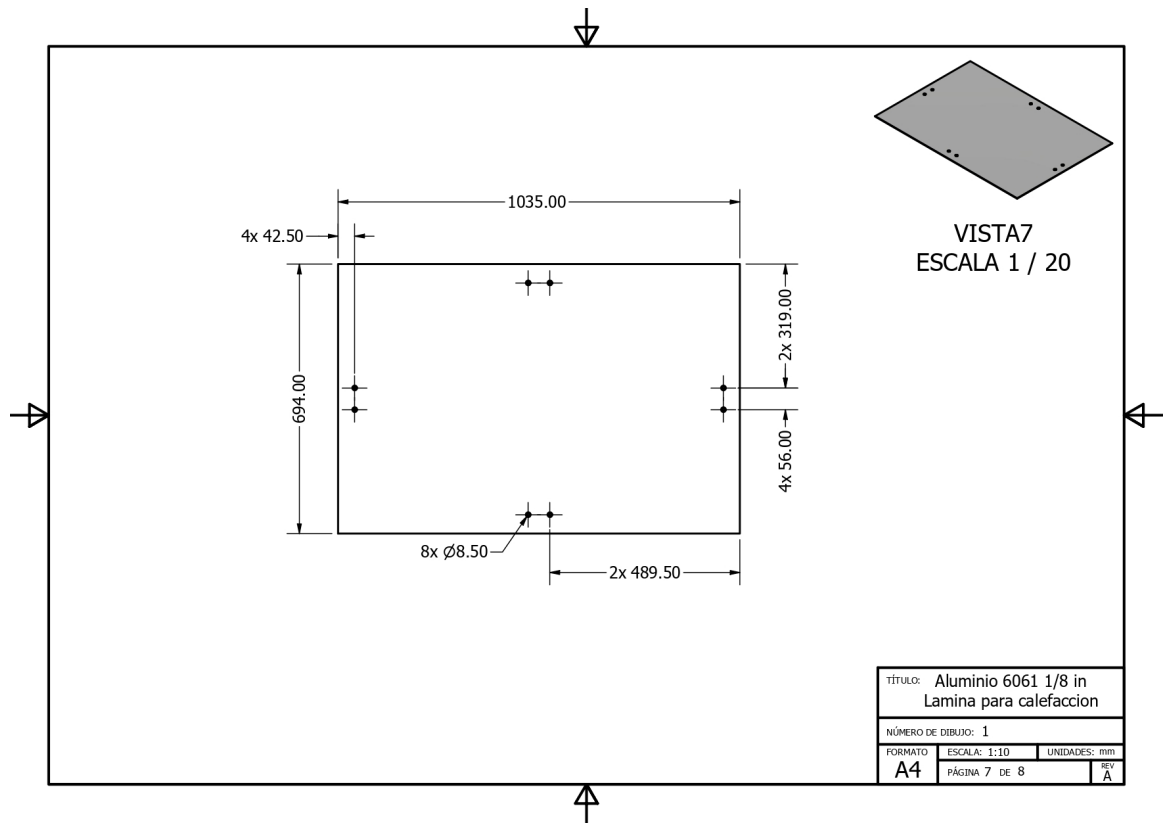
Nota. Pagina 5 - Juego de planos de fabricación. Elaboración propia.

Figura 42. Plano de fabricación



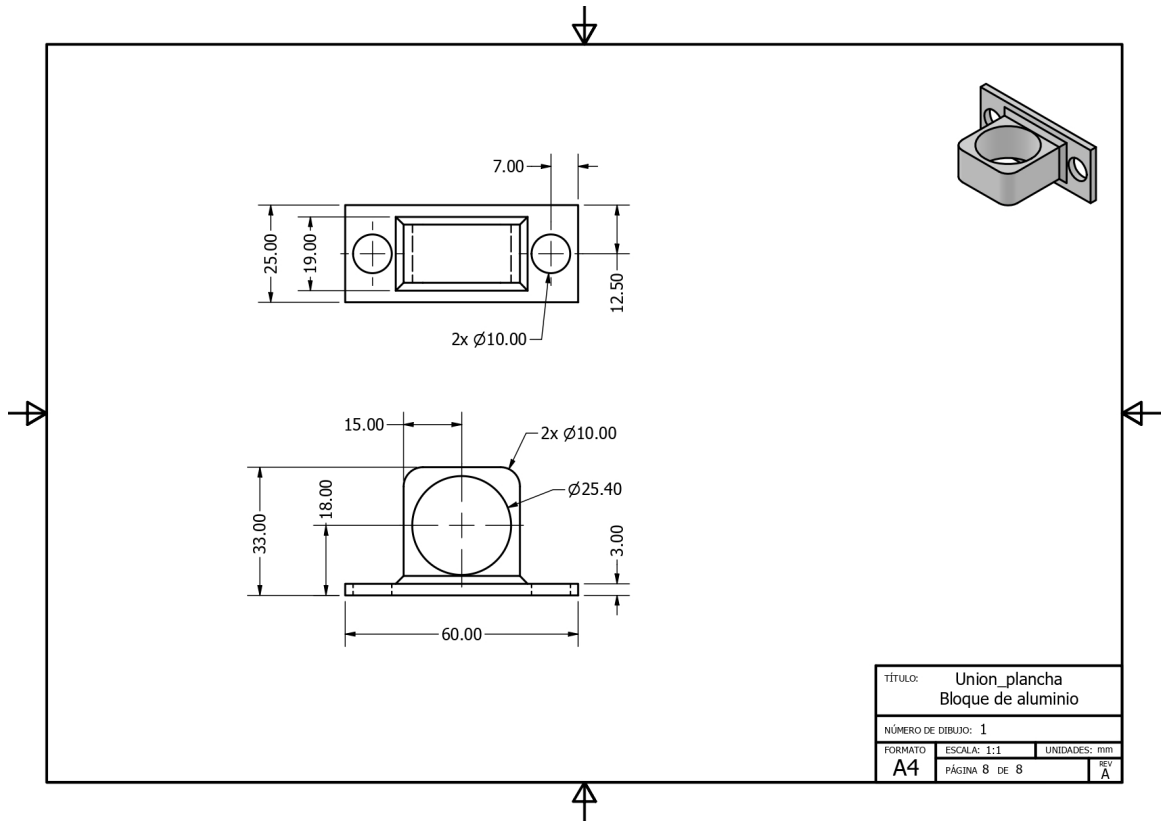
Nota. Pagina 6 - Juego de planos de fabricación. Elaboración propia.

Figura 43. Plano de fabricación



Nota. Pagina 7 - Juego de planos de fabricación. Elaboración propia.

Figura 44. Plano de fabricación – Página 8.



Nota. Juego de planos de fabricación. Elaboración propia.